

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ
СПРАВОЧНИК

2

ЭЛЕКТРО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
СПРАВОЧНИК
2

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК (В ТРЕХ ТОМАХ)

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ

профессоров Московского энергетического института
В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, В. А. Лабунцова, И. Н. Орлова (главный редактор), М. М. Соколова, А. М. Федосеева, А. Я. Шихина и инж. И. В. Антика

СЕДЬМОЕ ИЗДАНИЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Т О М II

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ И УСТРОЙСТВА



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1986

ББК 31.2
Э 45
УДК 621.3(035.5)

Электротехнический справочник: В 3-х т. Т. 2.
Э 45 Электротехнические изделия и устройства/Под общ.
ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И. Н. Орлов) и
др. — 7-е изд., испр. и доп. — М.: Энергоатомиздат,
1986. — 712 с.: ил.

Помещены сведения по кабельным изделиям, полупроводниковым приборам и интегральным микросхемам, резисторам, конденсаторам, реакторам, трансформаторам и автотрансформаторам, электрическим машинам (в том числе автоматических устройств), электрическим аппаратам высокого и низкого напряжения, реле защиты и автоматики, электромагнитам и системам с постоянными магнитами, вентиляльным преобразователям электрической энергии и химическим источникам тока. Шестое издание справочника было выпущено в 1981 г. Т. 1 вышел в 1985 г.

Для широкого круга инженеров-электриков.

Э 2302010000-065 — 127-86
051(01)-86

ББК 31.2

© Энергоатомиздат, 1986

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Раздел 18. Электрические кабели, провода и шины</i>	5	<i>Раздел 26. Электрические машины автоматических устройств</i>	408
<i>Раздел 19. Электроизоляционные конструкции и изоляторы</i>	72	<i>Раздел 27. Коммутационная и защитная аппаратура высокого напряжения</i>	441
<i>Раздел 20. Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы</i>	95	<i>Раздел 28. Трансформаторы тока и напряжения</i>	499
<i>Раздел 21. Резисторы, конденсаторы и реакторы</i>	131	<i>Раздел 29. Аппараты управления и рас-предустройств низкого напряжения</i>	538
<i>Раздел 22. Трансформаторы и автотрансформаторы</i>	181	<i>Раздел 30. Реле защиты, автоматики и управления</i>	585
<i>Раздел 23. Общие вопросы электрических машин</i>	222	<i>Раздел 31. Электромагниты и системы с постоянными магнитами</i>	600
<i>Раздел 24. Проектирование электрических машин</i>	274	<i>Раздел 32. Вентильные преобразователи электрической энергии</i>	616
<i>Раздел 25. Справочные данные по электрическим машинам</i>	342	<i>Раздел 33. Химические источники тока и их применение</i>	682
		<i>Предметный указатель</i>	703

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Материал второго тома подготовили:

- Раздел 18 — доктор техн. наук, проф. И. Б. Пешков (§ 18.1—18.7), доктор техн. наук, проф. С. Д. Холодный (§ 18.8—18.11, 18.21), канд. техн. наук, доц. Э. Т. Ларина (§ 18.12, 18.17—18.20), канд. техн. наук, доц. И. Б. Рязанов (§ 18.13—18.16).
- Раздел 19 — канд. техн. наук, доц. Ю. С. Пинталь (§ 19.1—19.3), канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Есиков (§ 19.4, 19.5, 19.7), инж. И. В. Дубов (§ 19.6, 19.8).
- Раздел 20 — канд. техн. наук, проф. А. Н. Старостин (§ 20.1—20.5), канд. техн. наук, доц. С. Г. Обухов (§ 20.6, 20.7).
- Раздел 21 — канд. техн. наук Е. Г. Акимов (§ 21.1), канд. техн. наук Е. Г. Акимов, канд. техн. наук А. И. Царенко (§ 21.2), канд. техн. наук, доц. М. А. Жаворонков и канд. техн. наук, доц. А. А. Чунихин (§ 21.3).
- Раздел 22 — доктор техн. наук, проф. П. М. Тихомиров.
- Раздел 23 — инж. М. А. Аванесов, доктор техн. наук, проф. А. В. Иванов-Смоленский и доктор техн. наук, проф. И. П. Копылов.

- Раздел 24 — канд. техн. наук Т. Т. Абарцумова и доктор техн. наук, проф. А. В. Иванов-Смоленский.
- Раздел 25 — канд. техн. наук Т. Т. Абарцумова и инж. М. А. Аванесов (§ 25.1—25.6, 25.9—25.14, 25.17—25.19, 25.22), доктор техн. наук, проф. Ф. М. Юферов (§ 25.7, 25.8, 25.15, 25.16, 25.20, 25.21).
- Раздел 26 — доктор техн. наук, проф. Ф. М. Юферов.
- Разделы 27 и 28 — канд. техн. наук, доц. А. А. Чунихин (§ 27.1—27.4, 27.6, 28.1—28.8, 28.10, 28.11), канд. техн. наук, доц. М. А. Жаворонков (§ 27.5, 27.7—27.10, 28.12).
- Раздел 29 — канд. техн. наук Н. Н. Дильдина, канд. техн. наук, доц. Г. Г. Нестеров и доктор техн. наук, проф. И. С. Таев.
- Раздел 30 — канд. техн. наук, доц. Г. Г. Нестеров (§ 30.1, 30.2), канд. техн. наук, доц. Ю. С. Коробков (§ 30.3—30.5).
- Раздел 31 — канд. техн. наук, доц. П. А. Курбатов (§ 31.1—31.3), канд. техн. наук, доц. В. Г. Сергеев (§ 31.4—31.8).
- Раздел 32 — канд. техн. наук, доц. Н. Н. Богданов, канд. техн. наук, доц. О. Г. Булатов и инж., ст. преп. М. Л. Фраткина.
- Раздел 33 — доктор хим. наук, проф. Н. В. Корвин.

Материал соответствующих разделов тома просмотрен заведующими кафедрами МЭИ: доктором техн. наук, проф. И. П. Копыловым, доктором техн. наук, проф. В. А. Лабунцовым, доктором техн. наук, проф. И. С. Таевым, канд. техн. наук, доц. В. С. Филиковым, доктором техн. наук, проф. А. Я. Шихиным.

Редактирование материалов тома осуществлено профессорами В. А. Лабунцовым, М. М. Соколовым и А. Я. Шихиным.

СОДЕРЖАНИЕ ПЕРВОГО ТОМА

Общие вопросы. Электротехнические материалы

- Раздел 1.* Развитие электроэнергетики, электрификации и электротехнической промышленности
Раздел 2. Единицы физических величин. Важнейшие физические постоянные
Раздел 3. Основные сведения по электрофизике
Раздел 4. Теоретические основы электротехники
Раздел 5. Планирование, организация и автоматизация электротехнического эксперимента
Раздел 6. Основы метрологии. Измерение электрических и магнитных величин
Раздел 7. Моделирование в электротехнике и электроэнергетике

- Раздел 8.* Применение вычислительной техники в электротехнике и электроэнергетике
Раздел 9. Общие вопросы исполнения и надежности электротехнического оборудования
Раздел 10. Основные правила оформления конструкторской документации
Раздел 11. Экономическая эффективность новой техники
Раздел 12. Безопасность электроустановок и электрооборудования
Раздел 13. Электроизоляционные материалы
Раздел 14. Полупроводниковые материалы
Раздел 15. Проводниковые материалы
Раздел 16. Магнитные материалы
Раздел 17. Контроль качества электротехнических материалов и изделий

СОДЕРЖАНИЕ ТРЕТЬЕГО ТОМА

Книга первая

Производство и распределение электрической энергии

- Раздел 34.* Электроэнергетические системы
Раздел 35. Переходные процессы в электроэнергетических системах и особые режимы электроэнергетических систем
Раздел 36. Электрические станции и подстанции (электрическая часть)
Раздел 37. Распределительные устройства
Раздел 38. Перенапряжения в электроэнергетических системах и защита от перенапряжений
Раздел 39. Электрические сети высокого напряжения
Раздел 40. Электропередачи переменного и постоянного тока
Раздел 41. Конструкции воздушных и кабельных линий
Раздел 42. Автоматика в электроэнергетических системах
Раздел 43. Автоматизация диспетчерского и технологического управления электроэнергетическими системами
Раздел 44. Защита в электроэнергетических системах
Раздел 45. Управление, контроль и сигнализация на электрических станциях и подстанциях
Раздел 46. Электроснабжение городов и населенных пунктов
Раздел 47. Электроснабжение сельского хозяйства

- Раздел 48.* Электроснабжение промышленных предприятий и транспорта
Раздел 49. Техничко-экономические показатели в электроэнергетике. Вопросы оптимизации и проектирования

Книга вторая

Использование электрической энергии

- Раздел 50.* Электропривод
Раздел 51. Автоматическое управление электроприводами
Раздел 52. Электропривод общепромышленных механизмов
Раздел 53. Электротермическое оборудование
Раздел 54. Оборудование для электротехнологий
Раздел 55. Оборудование для электросварки
Раздел 56. Электрическое освещение
Раздел 57. Электрооборудование взрывоопасных производств
Раздел 58. Электрический транспорт
Раздел 59. Электрооборудование автомобилей и тракторов
Раздел 60. Источники вторичного электропитания
Раздел 61. Электробытовые приборы
Раздел 62. Электрические ручные и переносные машины (электроинструмент)
Раздел 63. Индустриальные радиопомехи
Раздел 64. Промышленные шумы

Раздел 18

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ, ПРОВОДА И ШИНЫ

СОДЕРЖАНИЕ

18.1. Классификация кабельных изделий	5	18.13. Контрольные кабели и кабели управления	45
18.2. Медная проволока	6	18.14. Силовые и установочные провода и соединительные шнуры	51
18.3. Проволока алюминиевая и из алюминиевых сплавов	8	18.15. Различные кабели и провода с пластмассовой и резиновой изоляцией	55
18.4. Неизолированные провода	9	18.16. Монтажные кабели и провода	58
18.5. Шины и ленты	12	18.17. Обмоточные эмалированные провода	62
18.6. Контактные провода	14	18.18. Обмоточные провода с волокнистой, эмалево-волокнистой, бумажной и пленочной изоляцией	64
18.7. Профили для коллекторов электрических машин	15	18.19. Провода со стекловолокнистой изоляцией	66
18.8. Конструкции и маркировка силовых кабелей	16	18.20. Прочие типы обмоточных проводов	67
18.9. Электрические характеристики силовых кабелей	23	18.21. Цены на кабельные изделия	67
18.10. Способы прокладки силовых кабелей	25	Список литературы	71
18.11. Допустимые токи нагрузки	28		
18.12. Арматура силовых кабелей	35		

18.1. КЛАССИФИКАЦИЯ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Кабельная промышленность выпускает широкую номенклатуру кабельных изделий практически для всех отраслей народного хозяйства. Стандартизация и унификация конструкций кабелей и проводов позволяют удовлетворять потребности в кабельной продукции, обеспечивая в то же время достаточно высокий уровень их характеристик, включая надежность при эксплуатации.

Основными направлениями технического прогресса в кабельной технике являются:

повышение рабочих температур кабелей и проводов и снижение их материалоемкости, в первую очередь за счет применения новых проводниковых и электроизоляционных материалов;

микроминиатюризация кабельной продукции, связанная с уменьшением габаритов электронной и радиоаппаратуры, необходимостью снижения массы кабельных сетей на кораблях, самолетах и т. д.;

широкая механизация и автоматизация производства кабелей и проводов, что также определяют требования к их конструкции и в первую очередь предрасполагает к широкому использованию пластмасс, так как способы их наложения на токопроводящие жилы легче автоматизировать;

экономия таких остродефицитных металлов, как медь и свинец, с заменой их на менее дефицитные (замена меди на алюминий и биметалл алюминий — медь и свинец на алюминий, сталь и пластмассы). Эти тенденции должны учитываться потребителями кабельной продукции при выборе кабелей и проводов, при проектировании энергосистем и различного электротехнического и другого оборудования.

Кабельные изделия предназначены для передачи и распределения электрической энергии и сигналов связи и информации, выполнения электрических соединений в различных электротехнических устройствах, изготовления об-

моток электрических машин, аппаратов и приборов. Среди многих систем классификации кабельных изделий наиболее обоснованной является классификация кабелей и проводов по назначению, хотя исторически сложившиеся группировки иногда определяются по другим признакам, например по области применения.

Ниже приводятся важнейшие группы кабельных изделий и некоторые типы кабелей и проводов, входящих в состав этих групп.

1. *Неизолированные провода* предназначены в основном для использования при строительстве воздушных линий электропередачи. Провода изготавливаются из меди, алюминия, бронзы, а также комбинированными (стальной сердечник, поверх которого накладывается один или несколько повивов алюминиевой проволоки).

2. *Силовые кабели* предназначены для передачи и распределения электрической энергии. Кабели выпускаются с медными и алюминиевыми токопроводящими жилами с изоляцией из бумажных лент, пропитанных маслом или специальными составами, а также с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, полиэтилена, сшитого полиэтилена, резины. Диапазон переменных напряжений силовых кабелей — от 660 В до 500 кВ. Кабели имеют свинцовые, алюминиевые или пластмассовые оболочки.

3. *Кабели связи* предназначены для передачи сигналов связи и информации. Кабели имеют медные жилы и бумажную или пластмассовую изоляцию. В качестве пластмасс используются полиэтилен, поливинилхлоридный пластикат, полистирол. Изоляция может быть комбинированной: воздушно-бумажной или воздушно-полиэтиленовой. Кабели имеют свинцовые, алюминиевые, стальные, пластмассовые или металло-пластмассовые оболочки. Кабели связи делятся на высокочастотные и низкочастотные. Высокочастотные кабели — это кабели дальней связи, низкочастотные — кабели местной связи (городские телефонные, внутрирайонные и т. п.).

4. *Контрольные кабели* предназначены для

питания приборов, аппаратов и других электротехнических устройств и используются в цепях контроля. Контрольные кабели имеют токопроводящие жилы из меди, биметалла алюминий-медь, алюминия. Изоляция — в основном из полиэтилена и поливинилхлоридного пластика. Используется также резиновая изоляция. Число токопроводящих жил — от 4 до 37, сечения — от 0,75 до 10 мм².

5. *Кабели управления* используются для целей дистанционного управления и имеют медные жилы. В качестве изоляции используются полиэтилен, поливинилхлоридный пластикат, фторопласт, резина. Число токопроводящих жил — от 3 до 108. Все или отдельные токопроводящие жилы могут быть экранированными. Оболочки кабелей — пластмассовые. Поверх оболочки может накладываться панцирная броня из стальных проволок. Кабели управления могут иметь круглую или плоскую форму (ленточные кабели).

6. *Монтажные провода* используются для выполнения групповых соединений в различных схемах, т. е. для межблочного и внутриблочного монтажа аппаратуры. Токопроводящие жилы — медные, в том числе с покрытиями из серебра, никеля и олова, изоляция — полиэтилен, поливинилхлоридный пластикат, фторопласты. Часть монтажных проводов выпускается с изоляцией на основе стекловолокна, волокон лавсана и капрон, наложенной методом обмотки, с поверхностным лаковым покрытием. Монтажные провода, как и кабели управления, могут выполняться не только круглыми, но и ленточными.

7. *Установочные провода* предназначены для распределения электрической энергии в силовых и осветительных сетях на открытом воздухе и внутри помещений, в том числе для скрытой прокладки под штукатуркой, для выводов электродвигателей и питания различной переносной аппаратуры и приборов. Провода выпускаются одно- и многожильными (до 30) и в основном рассчитаны на напряжения до 3 кВ. Установочные провода изготавливаются с токопроводящими жилами из алюминия, меди и биметалла алюминий-медь. Изоляция — поливинилхлоридный пластикат, полиэтилен, резина, асбест, стекловолокно, резиностеклоткань. Диапазон сечений — от 0,50 до 120 мм². В соответствии с ГОСТ 22483-77 установлен следующий ряд сечений жил кабелей и проводов, мм²: 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,50; 0,75; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400; 500; 625; 800; 1000.

8. *Обмоточные провода* предназначаются для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. Токопроводящие жилы — из меди, алюминия, сплавов сопротивления (нихром, манганин, константан). В качестве изоляции применяются эмалевые покрытия на основе синтетических лаков, пропитанное лаками стекловолокно, натуральный шелк, синтетическая и хлопчатобумажная пряжа, ленки, бумага, пластмассы. В ограниченном объеме выпускаются обмоточные провода со сплошной стеклянной и стеклоэмалевой изоляцией. Диапазон размеров — от диаметра 12 мкм для круглых проводов до сечения 60—80 мм² для прямоугольных проводов.

9. *Радиочастотные кабели* предназначены для передачи высокочастотной энергии между антеннами и различными радиотехническими и электронными устройствами, а также для соединений внутри этих устройств. Выпускаемые кабели в основном имеют коаксиальную конструкцию. Жилы — медные, изоляция — из полиэтилена, фторопласта или полувоздушная (пористые пластмассы, шайбы, кордель и т. п.). Поверх изоляции наложены экран и защитная оболочка из полиэтилена или поливинилхлоридного пластика.

Рассмотренные группы кабельных изделий далеко не исчерпывают номенклатуру кабелей и проводов, насчитывающую около 30 000 марко-размеров. В частности, выпускаются судовые, грузонесущие, геофизические кабели, кабели для электрофильтров, бортовые провода, провода зажигания, жгуты автомобильных и автотракторных проводов и др.

В настоящем разделе рассматриваются только те группы кабельной продукции, которые предназначены для удовлетворения потребностей электротехники и энергетики. В частности, не приводятся сведения по кабелям связи, радиочастотным кабелям, используемым в технике связи.

18.2. МЕДНАЯ ПРОВОЛОКА

Медная проволока выпускается круглого и прямоугольного сечений и предназначена для изготовления проводов, кабелей и других электротехнических изделий. Круглая проволока изготавливается мягкой (марка ММ), твердой (марка МТ) и МС — для связи по ГОСТ 2112-79. Медная круглая проволока выпускается в диапазоне диаметров 0,02—9,42 мм. Предельные отклонения диаметра составляют от $\pm 0,002$ мм для тончайшей проволоки до $\pm 0,060$ мм для проволоки максимальных диаметров.

Удельное электрическое сопротивление проволоки постоянному току при 20 °С должно соответствовать значениям, приведенным в табл. 18.1.

Механические свойства круглой медной проволоки марок ММ и МТ должны соответствовать указанным в табл. 18.2.

Медная проволока марки МС должна иметь относительное удлинение не менее 1,5 %, а предел прочности при растяжении — в пределах 430—440 МПа (проволока марки МС выпускается только пяти диаметров: 2,0; 2,51; 3,00; 3,53; 4,00). Для круглой медной проволоки марки МТ диаметром от 1,0 до 6,0 мм и марки МС фиксируется минимальное число перегибов, которое составляет в зависимости от

Таблица 18.1. Удельное электрическое сопротивление круглой медной проволоки

Диаметр проволоки, мм	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м, не более, для марок	
	ММ	МТ, МС
До 1,00		0,0180
1,0—2,44	0,01724	0,0178
2,50 и более		0,0177

Таблица 18.2. Механические свойства круглой медной проволоки марок ММ и МТ

Диаметр проволоки, мм	Механические свойства проволоки марок					
	ММ		МТ			
	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Относительное удлинение, %, не менее	Высшая категория качества		I категория качества	
			Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Относительное удлинение, %, не менее	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	Относительное удлинение, %, не менее
0,02—0,025 0,03—0,05	200—290	6 10	450	—	450	—
0,06—0,063 0,071 0,080 0,090 0,100		12 13 14 15 16	430	—	420	—
0,112—0,12 0,125—0,15 0,16—0,19		17 18 19	430	0,6	400	0,6
0,20—0,58 0,60—0,97 1,0 1,04—1,95 2,00—3,00		20 25 30 30 30	430	0,6 1,0	400	0,6 1,0
3,02—5,00 5,2—9,42	200—270 200—260	30 30	400 380	1,5 2,0	380 360	1,5 2,0

диаметра 4—7 для проволоки марки МТ и 9—15 для проволоки марки МС.

Медная проволока прямоугольного сечения марок ПММ (мягкая) и ПМТ (твердая) изготавливается по ГОСТ 434-78. Если меньшую сторону проволоки обозначить как *a* (толщина), а большую — как *b* (ширина), то *a* находится в пределах 0,80—5 мм, а *b* равно 2—30 мм. В этом случае сечение выпускаемой прямоугольной проволоки колеблется от 1,46 до 149,14 мм². Сечения проволоки, используемые для производства эмалированных проводов, приведены в табл. 18.119.

Сечения прямоугольной медной проволоки рассчитываются с учетом радиусов закругления углов, которые составляют 0,5*a* при размере *a* до 1,00 мм включительно, 0,5 мм при 1,00—1,60 мм, 0,65 мм при 1,60—2,24 мм, 0,8 мм при 2,24—3,55 мм, 1,0 мм при 3,55 мм и более. Предельные отклонения размеров проволоки в зависимости от размеров сторон сечения составляют ±0,02 — ±0,35 мм.

Механические свойства прямоугольной проволоки должны соответствовать указанным в табл. 18.3.

Полный сортамент выпускаемой круглой медной проволоки приведен в табл. 18.118.

На круглую медную проволоку, предназначенную для последующего эмалирования, распространяется ОСТ 16.0.505.008-73, который регламентирует ряд повышенных требований к качеству проволоки по сравнению с ГОСТ 2112-79. Прежде всего это касается допусков на диаметр, которые значительно жестче. Так, предельные отклонения размера составляют +0,002 ÷ —0,001 мм для проволоки диаметром 0,071—0,10 мм, +0,005 ÷ —0,002 мм для проволоки диаметром 0,30—0,50 мм и т. д. В стан-

Таблица 18.3. Механические свойства медной проволоки прямоугольного сечения

Размер <i>a</i> , мм	Относительное удлинение, %, не менее, для марки ПММ		Предел прочности при растяжении, МПа, не менее, для марки ПМТ	
	Высшая категория качества	I категория качества	Высшая категория качества	I категория качества
До 0,80 включительно	35	—	300	300
0,85—1,32	35	30	300	310
1,40—3,35	35	32	280	200
3,55—7,00	35	34	280	250
Свыше 7,00	35	35	260	240

дарте оговаривается, что овальность проволоки не должна выводить размеры за предельные отклонения по диаметру. Мягкая медная проволока и твердая проволока диаметром 0,38—1,9 мм после отжига испытываются навиванием на стержень, диаметр которого равен диаметру испытываемой проволоки, при этом на проволоке не должны появляться такие дефекты, как заусенцы, расслаивание, изменение внешнего вида. Проволока диаметром 2,0 мм и более испытывается навиванием на стержень, диаметр которого равен двум диаметрам испытываемой проволоки. Круглая медная проволока, предназначенная для последующего эмалирования, должна изготавливаться из скальпированной катанки или из катанки, полученной методом непрерывного литья и прокатки. Прово-

Таблица 18.4. Механические свойства алюминиевой проволоки марок АТ, АПТ и АМ

Диаметр проволоки, мм	АТ		АПТ		АМ	
	Предел проч- ности при растяжении, МПа, не менее	Относитель- ное удлине- ние, %	Предел проч- ности при растяжении, МПа, не менее	Относитель- ное удлине- ние, %	Предел проч- ности при растяжении, МПа, не менее	Относитель- ное удлине- ние, %
0,08—0,10	100	0,5	—	—	—	—
0,112—0,30	120	0,5				
0,315—0,50	160	0,7				
0,52—0,60	180	1,0				
0,63—1,00	170	1,0	90—140	2,0	70—100	10
1,04—1,50	170	1,0				15
1,53—2,50	170	1,3				18
2,52—4,00	165	1,5		3,0		20
4,10—5,00	160	2,0				25
5,20—10,00	150	2,00				25

лока в диапазоне диаметров от 0,38 до 1,25 мм может изготавливаться из некальпированной катанки.

18.3. ПРОВОЛОКА АЛЮМИНИЕВАЯ И ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Круглая алюминиевая проволока, предназначенная для изготовления проводов и кабелей и других электротехнических целей, в соответствии с ГОСТ 6132-79 изготавливается твердой (марка АТ), полутвердой (марка АПТ), мягкой (марка АМ) и твердой повышенной прочности (марка АПн). Проволока изготавливается из алюминиевой катанки по ГОСТ 13843-78 и выпускается в диапазоне диаметров от 0,08 до 10,0 мм. В зависимости от диаметра проволоки предельные отклонения размеров проволоки колеблются от $\pm 0,004$ до $\pm 0,08$ мм.

Механические свойства проволоки марок АТ, АПТ, АМ должны соответствовать указанным в табл. 18.4, а марки АПн — в табл. 18.5.

Твердая повышенной прочности проволока и твердая алюминиевая проволока выдерживают без разрушения 7—8 перегибов, полутвердая — 14—18. Проволока марок АПн, АТ и АПТ диаметром менее 1,5 и более 5,0 мм, а также мягкая проволока на перегиб не испытываются.

Круглая проволока из алюминиевого сплава марки АВ-Е изготавливается по ТУ 16-501.016—74 и предназначена в основном для неизолированных проводов. Твердая проволока марки АСТ и мягкая марки АСМ выпускаются в диапазоне диаметров 0,30—4,15 мм. Проволока марки АСЗ, термомехани-

Таблица 18.5. Механические свойства проволоки марки АПн

Диаметр проволоки, мм	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
	не менее	
1,50—1,85	190	1,5
1,90—2,00	190	1,5
2,03—2,30	180	1,5
2,36—2,57	180	1,5
2,59—2,80	180	1,6
2,84—3,05	170	1,6
3,15—3,40	170	1,7
3,45—3,80	170	1,8
3,81—4,50	170	2,0

Таблица 18.6. Механические характеристики круглой проволоки из алюминиевого сплава

Показатели	АСТ	АСМ	АСЗ
Предел прочности при разрыве, МПа, не менее	200—240	100	280—320
Относительное удлинение, %, не менее	1,5	15,0	4,0

чески обработанная (закалка—волочение—искусственное старение), изготавливается диаметром 1,70—4,15 мм. Электрическое сопротивление постоянному току не должно превышать 0,030 мкОм·м для твердой проволоки, 0,0295 мкОм·м для мягкой и 0,0325 мкОм·м для термомеханически обработанной. Механические характеристики проволоки из алюминиевого сплава приведены в табл. 18.6.

Удельное электрическое сопротивление мягкой алюминиевой проволоки не должно превышать 0,0280 мкОм·м; твердой повышенной прочности, твердой и полутвердой — 0,0283 мкОм·м; проволоки, предназначенной для неизолированных линий электропередач, — 0,028264 мкОм·м.

Прямоугольная алюминиевая проволока, предназначенная для изготовления обмоточных проводов и других электротехнических целей, изготавливается по ГОСТ 10687-76. Проволока должна изготавливаться твердой марки ПАТ и мягкой марки ПАМ. Номинальные размеры проволоки по большей стороне b находятся в пределах от 2,00 до 18,0 мм, по меньшей стороне a — от 0,8 до 5,6 мм. Диапазон сечений выпускаемой прямоугольной алюминиевой проволоки — от 1,46 до 100 мм².

Для изготовления проволоки применяются как алюминиевые слитки по ГОСТ 4004-64, так и алюминиевая катанка по ГОСТ 13843-78. Проволока имеет закругленные углы, причем в зависимости от размеров проволоки радиус закругления составляет 0,5—1,0 мм. Механические свойства проволоки должны соответствовать указанным в табл. 18.7.

Удельное электрическое сопротивление проволоки постоянному току должно составлять не более 0,0280 мкОм·м для мягкой и не

Таблица 18.7. Механические свойства
прямоугольной алюминиевой проволоки

Механические свойства	Сечение проволоки, мм ²	Нормы для проволоки марок			
		ПАТ		ПАМ	
		с государственным знаком качества	I категории	с государственным знаком качества	I категории
Предел прочности при разрыве, МПа, не менее	<30 >30	130 125	120 120	72 70	70 70
Относительное удлинение, %, не менее	<30 >30	1,5 2,0	1,5 2,0	25 26	20 20

более 0,0283 мкОм·м для твердой проволоки. Гарантийный срок хранения проволоки — 6 мес.

18.4. НЕИЗОЛИРОВАННЫЕ ПРОВОДА

Неизолированные провода из меди, алюминия, алюминиевых сплавов, сталеалюминиевые изготавливаются в соответствии с ГОСТ 839-80 и предназначены для передачи электрической энергии в воздушных электрических сетях. Общий вид неизолированного провода для воздушных ЛЭП показан на рис. 18.1. Марки, конструкции и преимущественные области применения неизолированных проводов приведены в табл. 18.8.

По требованию потребителя алюминиевые и сталеалюминиевые провода марок АКП,

Таблица 18.8. Марки, конструкции и преимущественные области применения
неизолированных проводов

Марки проводов	Конструкции проводов	Преимущественные области применения
М	Провод, состоящий из одной или нескольких скрученных медных проволок	В атмосфере воздуха типов II и III на суше и море всех климатических районов по ГОСТ 15150-69
А	Провод, состоящий из скрученных алюминиевых проволок	В атмосфере воздуха типов I и II при условии содержания в атмосфере сернистого газа, дающего осадок не более 150 мг/(м ² ·сут), на суше всех микроклиматических районов по ГОСТ 15150-69, кроме районов ТВ и ТС
Ап	То же, но из алюминиевых проволок марки АТп	То же
АКП	Провод марки А, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	На побережьях морей, соленых озер, в промышленных районах и в районах засоленных песков, а также в прилегающих к ним районах с атмосферой воздуха типов II и III, на суше и море всех микроклиматических районов по ГОСТ 15150-69
АпКП	То же, но провод марки Ап	То же
АС	Провод, состоящий из стального сердечника и алюминиевых проволок	См. марку А
АпС	То же, но из алюминиевых проволок марки АТп	То же
АСКС	Провод марки АС, но межпроволочное пространство стального сердечника, включая его наружную поверхность, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	На побережьях морей, соленых озер, в промышленных районах с атмосферой воздуха типов II и III, но при условии содержания в атмосфере сернистого газа, дающего осадок не более 150 мг/(м ² ·сут), и хлористых солей не более 200 мг/(м ² ·сут) на суше всех микроклиматических районов по ГОСТ 15150-69, кроме районов ТВ
АпСКС	То же, но провод марки АпС	То же
АСКП	Провод марки АС, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	См. марку АКП
АпСКП	То же, но провод марки АпС	То же
АСК	Провод марки АС, но стальной сердечник изолирован двумя лентами полиэтилентерефталатной пленки. Стальной сердечник под лентами должен быть покрыт нейтральной смазкой повышенной термостойкости	См. марку АСК
АпСК	То же, но провод марки АпС	То же
АН	Провод, скрученный из проволок из нетермообработанного алюминиевого сплава	См. марку А
АНКП	Провод марки АН, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	См. марку АКП
АЖ	Провод, состоящий из скрученных проволок из термообработанного алюминиевого сплава	См. марку А
АЖКП	Провод марки АЖ, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	См. марку АКП

Примечания: 1. Типы атмосфер делятся на I, II и III в зависимости от содержания коррозионно-активных агентов. Атмосфера типа I примерно соответствует атмосфере сельской, лесной, горной местности вдали от промышленных объектов, типа II — атмосфере промышленных районов, типа III — морской.

2. Микроклиматический район ТВ—район с влажным тропическим климатом, ТС — с сухим тропическим климатом (исполнения электротехнических изделий для эксплуатации в этих районах могут быть обозначены термином «тропическое исполнение»).

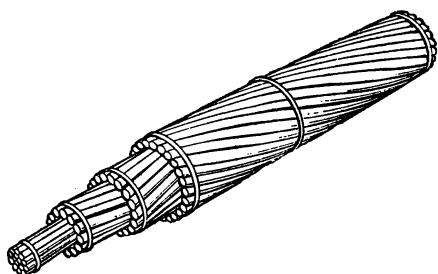


Рис. 18.1. Неизолированный провод для воздушных ЛЭП

АНКП, АЖКП, АСКП могут изготавливаться с наружной поверхностью, покрытой термостой-

кой смазкой. В этом случае к марке провода добавляют букву З.

Медные неизолированные провода выпускаются в диапазоне сечений от 4 до 400 мм² с числом проволок от 1 до 37, алюминиевые — от 16 до 800 мм² с числом проволок от 7 до 61, из алюминиевого упрочненного сплава — от 16 до 185 мм² с числом проволок от 7 до 19.

Провода типа АС выпускаются в диапазоне сечений: для сечения алюминиевой части провода — от 10 до 100 мм², для сечения стального сердечника — от 1,8 до 336 мм². Число проволок, образующих стальной сердечник, колеблется от 1 до 61; алюминиевая часть содержит от 6 до 96 проволок. Отношение сечения алюминиевой части проводов к сечению стального сердечника изменяется в широких пределах (1,46—18,09). Скрутка средних повн-

Таблица 18.9. Основные расчетные характеристики медных неизолированных проводов марки М

Номинальное сечение, мм ²	Сечение, мм ²	Диаметр, мм	Сопротивление постоянному току при 20°C, Ом/км, не более	Разрывное усилие провода, Н, не менее		Масса, кг/км
				медной проволоки марки МГ высшей категории качества	медной проволоки марки МТ высшей категории качества	
4	3,94	2,2	4,60092	1550	1660	35
6	5,58	2,7	3,07019	2290	2470	52
10	9,89	3,6	1,81978	3690	3880	88
16	15,90	5,1	1,15730	5600	6030	142
25	24,90	6,4	0,73367	8800	9460	224
35	34,61	7,5	0,52386	12 300	13 140	311
50	49,40	9,0	0,36822	16 590	17 450	444
70	67,70	10,7	0,27238	25 220	27 110	612
95	94,00	12,6	0,19449	35 010	37 640	850
120	117,0	14,0	0,15603	43 600	46 840	1058
150	148,0	15,8	0,12388	52 390	55 150	1338
185	183,0	17,6	0,10015	68 190	73 300	1659
240	234,0	19,9	0,07809	87 300	93 240	2124
300	288,0	22,1	0,05379	101 900	107 400	2614
350	346,0	24,2	0,03309	123 070	128 830	3135
400	389,0	25,5	0,04713	137 680	144 990	3528

Таблица 18.10. Основные расчетные характеристики алюминиевых неизолированных проводов марок А, АКП, Ал, АлКП

Номинальное сечение, мм ²	Сечение, мм ²	Диаметр, мм	Сопротивление постоянному току при 20°C, Ом/км, не более	Разрывное усилие провода, Н, не менее		Масса, кг/км (без смазки)	Масса смазки для марки АКП, кг
				из алюминиевой проволоки марки АТ	из алюминиевой проволоки марки АТп		
16	15,9	5,1	1,83763	—	2740	43	—
25	24,9	6,4	1,16450	—	4110	68	—
35	34,3	7,5	0,8502	—	5610	94	—
50	49,5	9,0	0,5880	7200	7770	135	—
70	69,2	10,7	0,4204	10 080	10 700	189	—
95	92,4	12,3	0,31467	13 040	13 800	252	—
120	117,0	14,0	0,2510	—	19 620	321	16
150	148,0	15,8	0,19780	22 750	24 120	406	20
185	183,0	17,5	0,1611	28 120	29 830	502	25
240	239,0	20,0	0,1230	36 650	37 840	655	33
300	288,0	22,1	0,10170	44 300	46 950	794	54
350	346,0	24,2	0,08480	53 200	56 480	952	65
400	389,0	25,6	0,07563	59 800	63 420	1072	73
450	442,0	27,3	0,06657	67 940	69 760	1217	83
500	500,0	29,1	0,05876	74 530	79 490	1378	94
550	544,0	30,3	0,05400	83 590	88 660	1500	117
600	587,0	31,5	0,05034	90 170	95 630	1618	126
650	641,0	32,9	0,04592	98 600	104 570	1769	138
700	691,0	34,2	0,04257	106 290	112 720	1907	149
750	747,0	35,6	0,03933	114 600	118 320	2061	161
800	805,0	36,9	0,03653	119 980	127 480	2220	173

Таблица 18.11. Основные расчетные характеристики неизолированных проводов из алюминиевого сплава марок АН, АЖ, АНКП, АЖКП

Номинальное сечение, мм ²	Сечение, мм ²	Диаметр, мм	Сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км, не более		Разрывное усилие провода, Н, не менее		Масса, кг/км (без смазки)	Масса смазки для марок АНКП, АЖКП, кг/км
			АН, АНКП	АЖ, АЖКП	АН, АНКП	АЖ, АЖКП		
16	15,9	5,1	1,9505	2,1130	3550	4660	43	—
25	24,9	6,4	1,2365	1,3396	5110	6970	68	—
35	34,3	7,5	0,9023	0,9775	7030	9600	94	—
50	49,5	9,0	0,6241	0,6761	10 140	13 830	135	—
120	117,0	14,0	0,2664	0,2886	23 270	32 680	321	16
150	148,0	15,8	0,2113	0,2289	30 330	41 360	406	20
185	183,0	17,5	0,1707	0,1856	37 450	51 060	502	25

Таблица 18.12. Основные расчетные характеристики неизолированных сталеалюминевых проводов марок АС, АСКС, АСКП, АСК, АпС, АпСКП, АпСКС, АпСК

Номинальное сечение, мм ² , алюминий/сталь	Сечение, мм		Диаметр, мм		Сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км, не более	Разрывное усилие провода, Н, не менее		Масса, кг/км			
	Алюминий	Сталь	провода	стально-го сердечника		из алюминевой проволоки марки АТ	из алюминевой проволоки марки АТП	провода (без смазки)	смазки для		смазки и пленки для АСК, АпСК
									АСКС, АпКС	АСКП, АпСП	
10/1,8	10,6	1,77	4,5	1,5	2,76630	—	4090	43	1,0	1,0	—/0,56
16/2,7	16,1	2,69	5,6	1,9	1,80934	—	6220	65	1,0	1,0	—/0,56
25/4,2	24,9	6,15	6,9	2,3	1,17590	—	930	100	1,5	1,5	—/0,56
35/6,2	36,9	6,15	8,4	2,8	0,78970	—	13 520	148	2,5	2,5	—/0,84
50/8,0	48,2	8,04	9,5	3,2	0,60298	16 640	17 110	195	3,0	3,0	—/0,84
70/11	68,0	11,3	11,4	3,8	0,42859	23 460	24 130	276	4,5	4,5	—/1,12
70/72	68,4	72,2	15,4	11,0	0,42760	—	96 830	755	38	38	19/3
95/16	95,4	15,9	13,5	4,5	0,30599	32 430	33 370	385	6,0	6,0	—/1,4
120/19	118,0	18,8	15,2	5,5	0,24917	—	41 520	471	11	35	9/2
95/141	91,2	141,0	19,8	15,4	0,32108	—	180 780	1357	69	69	24/4
120/27	114,0	26,6	15,4	6,6	0,25293	—	49 460	528	14	37	12/2
150/19	148,0	18,6	16,8	5,5	0,19919	—	46 300	554	12	42	9/2
150/24	149,0	24,2	17,1	6,3	0,19798	—	52 280	559	14	44	11/2
150/34	147,0	34,3	17,5	7,5	0,20065	—	62 640	675	18	48	15/2
185/24	187,0	24,2	18,9	6,3	0,15701	56 240	58 080	705	14	51	11/2
185/29	181,0	29,0	18,8	6,9	0,16218	59 630	62 050	728	16	52	13/2
185/43	185,0	43,1	19,6	8,4	0,15954	—	77 770	846	23	61	18/2
185/128	187,0	128,0	23,1	14,7	0,15762	—	183 800	1525	63	101	23/4
205/27	205,0	26,6	19,8	6,6	0,14294	61 730	63 740	774	15	57	12/2
240/32	244,0	31,7	21,6	7,2	0,12060	72 660	75 050	921	17	66	14/2
240/39	236,0	38,6	21,6	8,0	0,12428	78 580	80 890	952	22	71	16/2
240/56	241,0	56,3	22,6	9,6	0,12182	95 890	98 250	1106	30	78	22/3
300/39	301,0	38,6	24,0	8,0	0,09747	89 160	90 570	1132	22	83	16/2
300/48	295,0	47,8	24,1	8,9	0,09883	97 760	100 620	1186	27	87	19/3
300/66	288,0	65,8	24,5	10,5	0,10226	123 440	126 270	1313	37	95	17/3
300/67	288,0	67,3	24,5	10,5	0,10226	114 700	117 520	1317	37	95	17/3
300/204	298,0	204,0	29,2	18,6	0,09934	—	284 580	2428	102	164	34/5
330/30	319,0	26,6	24,2	6,6	0,09387	84 560	88 850	1106	12	112	12/2
330/43	332,0	43,1	25,2	8,4	0,09888	—	103 780	1265	23	133	18/3
400/18	381,0	18,8	26,0	5,6	0,07752	81 860	86 600	1199	12	131	10/2
400/22	394,0	22,0	26,6	6,0	0,07501	—	95 110	1261	12	133	10/2
400/51	394,0	51,1	27,5	9,2	0,07477	115 380	120 480	1490	28	134	21/3
400/64	390,0	63,5	27,7	10,2	0,07528	125 370	129 180	1572	35	115	25/3
400/93	406,0	93,2	29,1	12,5	0,07247	169 740	173 710	1851	53	133	23/4
450/56	434,0	56,3	28,8	9,6	0,06786	127 110	131 370	1640	30	145	22/3
500/26	481,0	26,6	29,4	6,6	0,06129	107 270	112 190	1537	15	158	12/2
500/27	481,0	26,6	29,4	6,6	0,06129	106 390	112 550	1537	15	152	12/2
500/64	490,0	63,5	30,6	10,2	0,06005	143 450	143 260	1852	33	163	25/3
500/204	496,0	204,0	34,5	18,6	0,06025	312 310	319 600	2979	105	230	20/3
500/336	490,0	336,0	37,5	23,9	0,06040	461 820	466 650	4005	168	270	43/6
550/71	549,0	71,2	32,4	10,8	0,05381	160 780	166 160	2076	38	184	27/3
600/72	580,0	72,2	33,2	11,0	0,05091	178 150	183 830	2170	39	194	19/3
650/79	634,0	78,9	34,7	11,5	0,04655	192 370	200 450	2372	42	230	20/3
700/86	687,0	85,9	36,2	12,0	0,04289	209 010	217 770	2575	46	253	21/3
750/93	748,0	93,2	37,2	12,5	0,03839	227 110	234 450	2800	49	272	25/4
800/105	821,0	105,0	39,7	13,3	0,03586	252 020	260 070	3092	57	310	25/4
1000/56	1002,9	56,3	42,4	9,6	0,02936	214 270	224 050	3062	30	355	22/3

вов неизолированных проводов производится в противоположные стороны, причем наружный покров должен иметь правое направление скрутки.

При расчете электрического сопротивления неизолированных проводов постоянному току учитываются коэффициент укрутки проволок, зависящий от их числа, и коэффициент, учиты-

Таблица 18.13. Допустимые длительные токовые нагрузки на неизолированные провода, А (по данным института «Энергосетьпроект»)

Сечение, мм ²	Марка провода	Вне помещений	Внутри помещений	Сечение, мм ²	Марка провода	Вне помещений	Внутри помещений	Сечение, мм ²	Марка провода	Вне помещений	Внутри помещений	Сечение, мм ²	Марка провода	Вне помещений	Внутри помещений
10/1,8	АС	84	53	70/11	АС	265	210	150	А	440	355	300	М	880	740
10	М	95	60	70	М	337	268	185/24	АС	520	430	300	А	680	570
16/2,7	АС	111	79	70	А	265	210	185/29	АС	510	425	330/27	АС	730	—
16	М	133	102	95/16	АС	330	260	185/43	АС	515	—	400/22	АС	830	713
16	А	105	75	95	М	422	341	185	М	650	540	400/51	АС	825	705
25/4,2	АС	142	109	95	А	320	255	185	А	500	410	400/64	АС	860	—
25	М	183	137	120/19	АС	390	313	240/32	АС	605	505	400	М	1050	895
25	А	136	106	120	М	485	395	240/39	АС	610	505	400	А	815	690
35/6,2	АС	175	135	120	А	375	300	240/56	АС	610	—	500/27	АС	960	830
35	М	223	173	120/27	АС	375	—	240	М	760	685	500	А	980	820
35	А	170	130	150/19	АС	450	365	240	А	590	490	600/72	АС	1050	920
50/8	АС	210	165	150/24	АС	450	365	300/39	АС	710	600	600	А	1100	955
50	М	275	219	150/34	АС	450	—	300/48	АС	690	585	700/86	АС	1180	1040
50	А	215	165	150	М	570	465	300/66	АС	680	—	—	—	—	—

Примечания: 1. Длительные токовые нагрузки одинаковы для проводов марок АС, АСКС, АСК и АСКП.
2. Для сталеалюминиевых проводов в числителе показано сечение алюминия, а в знаменателе — сечение стали.

вающий допуск на диаметр проволоки. В проводах со стальным сердечником проводимость стального сердечника не учитывается, а за электрическое сопротивление принимается только сопротивление алюминиевой части. При расчете разрывного усилия неизолированных проводов во внимание принимаются разрывное усилие проволоки с учетом допуска на диаметр, число проволок, коэффициент, учитывающий наличие мест срачивания, вызывающих снижение механической прочности. Срачивание отдельных медных, алюминиевых, из алюминиевого сплава или стальных проволок при скрутке провода должно производиться сваркой на расстоянии между местами срачивания различных проволок не менее 15 м. Срачивание проволок при скрутке семипроволочных проводов марок АН, АНКП, АЖ, АЖКП не допускается. Также не допускается срачивание однопроволочного медного провода или стального сердечника.

Основные расчетные параметры неизолированных проводов различных типов приведены в табл. 18.9—18.13.

Срок службы неизолированных проводов должен быть: не менее 45 лет — для проводов марок М, А, Ап, АС, АпС; 25 лет — для проводов марок АКП, АпКП, АН, АНКП, АЖ, АЖКП, АСКП, АпСКС; 10 лет — для проводов марок АСКС, АпСКС, АСК, АпСК. Гарантийный срок эксплуатации — 4 года с момента ввода проводов в эксплуатацию. Естественно, что при этом должны соблюдаться как технические требования, приведенные в документации на провода, так и правила устройства и эксплуатации воздушных линий.

Кабельной промышленностью выпускаются также полые неизолированные провода без поддерживающей опоры, применяемые в воздушных электрических сетях для передачи электроэнергии, для ошиновки станций и переключательных пунктов. Полые провода выпускаются медными (марка ПМ) и алюминиевыми (марка ПА) по ТУ 16.505.397-72.

Полый провод состоит из твердых медных или алюминиевых проволок фасонного сечения,

образующих один повив и соединенных друг с другом в замок без поддерживающего каркаса. Медный провод выпускается сечениями 240 и 300 мм², алюминиевый — 500 и 600 мм². Срок службы провода — не менее 25 лет.

Медные неизолированные гибкие провода, выпускаемые по ГОСТ 20685-75, применяются в электротехнических установках и устройствах, а также используются в качестве антенн. Провода изготавливаются следующих марок: МА — медный антенный неизолированный, МГ — медный гибкий неизолированный, МГЭ — медный гибкий для электропечей неизолированный. Провода марки МА выпускаются в диапазоне сечений от 1,5 до 16,0 мм² с числом скрученных проволок в жиле от 7 до 19, марки МГ — от 1,5 до 500 мм² с числом проволок от 19 до 703, марки МГЭ — от 240 до 1000 мм² с числом проволок от 570 до 1026. В проводах марки МГЭ стренги скручиваются вокруг сердечника, состоящего из пропитанной кабельной пряжи. Провода предназначены для работы в условиях относительной влажности воздуха не более 80 % при 20 °С. Срок службы проводов — не менее 5 лет.

18.5. ШИНЫ И ЛЕНТЫ

Шины и ленты электротехнического назначения выпускаются медными и алюминиевыми. Медные шины и ленты (ГОСТ 434-78) применяются в тех случаях, когда используется их повышенная гибкость, в коррозионных условиях и т. д. Медные ленты выпускаются следующих марок: ЛММ — ленты медные мягкие и ЛМТ — ленты медные твердые. Марки медных шин: ШММ — шины мягкие медные, ШМТ — шины медные твердые, ШМТВ — шины медные твердые из бескислородной меди. Обозначения размеров шин и лент такие же, как и для прямоугольной проволоки: *a* — меньшая сторона (толщина), *b* — большая сторона (ширина). Медные ленты выпускаются шириной от 8 до 100 мм и толщиной от 0,10 до 3,53 мм, т. е. их сечения находятся в широком

диапазоне — от 0,80 до 298 мм². Шины отличаются от лент большей толщиной ($a=4,0 \div 30,0$ мм). Номинальный размер шин по стороне b составляет от 16 до 120 мм. Минимальное сечение выпускаемых медных шин 180 мм², максимальное 1500 мм². Предельные отклонения размеров шин по сторонам a и b находятся в пределах от $\pm 0,02$ до 0,35 мм в зависимости от размеров шин. Предельные отклонения самых тонких лент по толщине составляют $\pm 0,01$ мм, самых толстых $\pm 0,06$ мм, по ширине соответственно эти цифры равны $\pm 0,08$ и $\pm 0,35$ мм. Механические свойства ленты и мягких шин должны соответствовать указанным в табл. 18.14.

Таблица 18.14. Механические свойства ленты и мягких шин

Размер a , мм	Относительное удлинение, %, не менее, для марок ЛММ и ШММ	Предел прочности при разрыве, МПа, не менее, для марки ЛМТ
$<0,80$	—	300
0,85—1,32	30	300
1,40—3,35	32	270
3,55—7,00	34	260
Свыше 7,00	35	—

Шины марки ШММ, которым присвоена высшая категория качества, должны иметь относительное удлинение 37 % для размера a от 3,35 до 7,00 мм и 40 % для размера a свыше 7,00 мм. Число Бринелля шин марок ШМТ и ШМТВ должно быть не менее 65. Механические свойства мягкой ленты толщиной до 1,0 мм проверяются при испытании на вытяжку сферической лунки (по Эриксену). Серповидность твердых медных шин не должна по стороне b превышать 4 мм на 1 м длины, а для лент толщиной 3 мм и более — 3 мм на 1 м длины. Ленты толщиной до 0,5 мм поставляются в рулонах. Шины упаковываются в пакки. Гарантийный срок хранения лент и твердых шин — 6 мес с момента изготовления, мягких шин — 12 мес.

Неизолированные алюминиевые шины прямоугольного сечения марки ШАТ, предназначенные для токопроводов, распределительных устройств, сборок и других электрических цепей, выпускаются по ТУ 16-705.002-77. Шины изготавливаются из твердой алюминиевой проволоки. Номинальные размеры, расчетные сечения и предельные отклонения шин по ширине (большей стороне b) должны соответствовать указанным в табл. 18.15.

Предельные отклонения по толщине составляют: $\pm 0,25$ мм при $a=3$ мм; $\pm 0,30$ мм при $a=4 \div 6$ мм; $\pm 0,40$ мм при 8 и 10 мм; $\pm 0,50$ мм при 12 мм. По требованию потребителя шины могут изготавливаться с радиусом закругления, равным $a/2$. Шины изготавливаются в полосах длиной от 3 до 9 м, а шины толщиной до 6 мм включительно могут поставляться свернутыми в бухты. Серповидность шин, если они поставляются в полосах, не должна превышать 3 мм на длине 1 м.

Шины изготавливаются из алюминия марки А5Е по ГОСТ 11069-79, причем удельное электрическое сопротивление шин постоянному току не должно превышать 0,0282 мкОм·м. Предел прочности при растяжении шин составляет

Таблица 18.15. Расчетные сечения неизолированных алюминиевых шин

Размеры шин по стороне b , мм	Номинальный размер шин по стороне a , мм						
	3	4	5	6	8	10	12
10	30	40	—	—	—	—	—
12	36	48	—	—	—	—	—
15	45	60	—	—	—	—	—
20	60	80	—	—	—	—	—
25	75	100	—	—	—	—	—
30	90	120	150	—	—	—	—
40	120	160	200	—	—	—	—
50	—	—	250	300	—	—	—
60	—	—	300	360	480	600	—
80	—	—	400	480	640	800	—
100	—	—	—	600	800	1000	1200
120	—	—	—	—	960	1200	1440

для сечений до 500 мм² не менее 118 МПа, для сечений свыше 500 мм² — не менее 113 МПа. Относительное удлинение должно быть соответственно не менее 5 и 6 %. Срок службы алюминиевых неизолированных шин установлен равным 25 годам.

Прессованные шины прямоугольного сечения электротехнического назначения выпускаются из алюминия марки АД0 и алюминиевого сплава марки АД31 в соответствии с ГОСТ 15176-84. Сечение шин — от 0,30 до 258 см², ширина — от 6 до 500 мм, толщина — от 3 до 110 мм.

Механические свойства образцов, вырезанных из шин в продольном направлении, должны удовлетворять требованиям, указанным в табл. 18.16.

Таблица 18.16. Механические свойства образцов из прессованных алюминиевых шин

Марка	Площадь сечения, см ²	Механические свойства при растяжении шин, не менее		
		Предел прочности при растяжении, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
АД0	100	70	—	15
	100,1—300	60	—	15
АД31Т	Все размеры	130	60	13
АД31Т-1	То же	200	150	8

Примечание. Марка АД0 — шины без термической обработки. АД31Т — закаленные и состаренные в естественных условиях, АД31Т-1 — закаленные и состаренные в искусственных условиях.

Удельное электрическое сопротивление постоянному току для шин из алюминия марки АД0 — не более 0,0290 мкОм·м, для шин из алюминиевого сплава марки АД31Т1 — не более 0,0325 мкОм·м, для шин из сплава АД31Т — не более 0,0350 мкОм·м.

Прессованные алюминиевые шины поставляются в пачках массой не более 300 кг, а термически не обработанные шины немерной длины толщиной до 6 мм могут поставляться в бухтах с наружным диаметром не более 1200 мм.

18.6. КОНТАКТНЫЕ ПРОВОДА

Основная часть контактных проводов изготавливается из низколегированной меди и бронзы. Контактные провода применяются в воздушных электрических сетях для передачи энергии электротранспорту (см. также разд. 58).

Бесстыковые медные низколегированные и бронзовые контактные провода выпускаются в соответствии с ГОСТ 2584-75. Провода изготавливаются фасонными круглыми (рис. 18.2) и фасонными овальными (рис. 18.3). Типы вы-МК

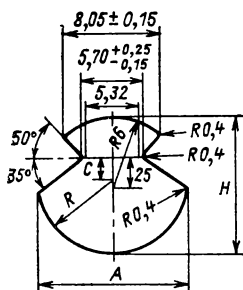


Рис. 18.2. Конструкция фасонного круглого контактного провода

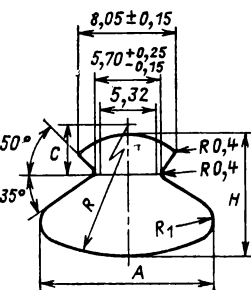


Рис. 18.3. Конструкция фасонного овального контактного провода

пускаемых проводов и условия их применения указаны в табл. 18.17.

Номинальные сечения, номинальные диаметры и расчетная масса круглых проводов должны соответствовать указанному в табл. 18.18.

Номинальные сечения, размеры, допустимые отклонения и расчетная масса фасонных и фасонных овальных проводов приведены в табл. 18.19.

Бронзовые контактные провода должны иметь в верхней части сечения отличительную канавку (рис. 18.4). Низколегирован-

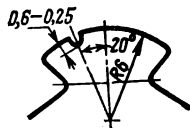


Рис. 18.4. Контактный провод с отличительной канавкой

ные контактные провода должны иметь в верхней части сечения отличительную канавку строго по вертикальной оси провода. Строительные длины проводов в зависимости от сечения составляют 1000—5500 м.

Таблица 18.17. Марки и условия применения контактных проводов

Марка провода	Наименование провода	Условия применения	
		Допустимая температура применения, °С	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее
МФ	Контактный медный круглый	90	118
МФО	Контактный медный фасонный	95	118
НЛФ	Контактный медный фасонный овальный	95	118
НЛФО	Контактный низколегированный фасонный	110	127
НЛФО	Контактный низколегированный фасонный овальный	110	127
БрФ	Контактный бронзовый фасонный	130	137
БрФО	Контактный бронзовый фасонный овальный	130	137

Медные контактные провода должны изготавливаться из катанки, полученной методом непрерывного литья и прокатки, со светлой поверхностью, не требующей последующего травления. Марки фасонных и фасонных овальных проводов устанавливаются в зависимости от химического состава. Так, фасонный низколегированный провод с присадкой 0,05 % Mg обозначается как ЕЛМг0,05Ф, с 0,05 % Zr — НЛЦр0,05Ф и т.д. В качестве присадок для низколегированных контактных проводов используются Mg (0,04—0,06 %), Zr (0,04—0,06 %), Sn (0,03—0,06 %), Si (0,03—0,06 %), Ti (0,01—0,04 %). Леггирующими компонентами меди для бронзовых контактных проводов являются Mg (0,10—0,30 %), Cd (0,8—1,1 %), Zr (0,1—0,6 %). Удельное электрическое сопротивление проводов постоянно току при

Таблица 18.18. Основные размеры круглых контактных проводов

Номинальное сечение, мм²	Номинальный диаметр, мм	Расчетная масса 1 км провода, кг	Номинальное сечение, мм²	Номинальный диаметр, мм	Расчетная масса 1 км провода, кг
30	6,2	267	65	9,1	578
40	7,1	356	85	10,4	755
50	8,0	445	100	11,3	890

Таблица 18.19. Основные размеры фасонных и фасонных овальных проводов

Сечение, мм ²	Размеры проводов, мм				Расчетная масса 1 км провода, кг
	фасонных		фасонных овальных		
	A	H	A	H	
65	10,19±0,20	9,30±0,08	—	—	578
85	11,76±0,22	10,80±0,10	—	—	755
100	12,81±0,25	11,80±0,11	14,92±0,30	10,50±0,10	890
120	13,90±0,30	12,90±0,12	16,10±0,32	11,50±0,11	1068
150	15,50±0,32	14,50±0,13	18,86±0,35	12,50±0,12	1335

Таблица 18.20. Механические свойства медных и низколегированных контактных проводов

Номинальное сечение провода, мм²	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее		Относительное удлинение, %, не менее		Число перегибов в плоскости симметрии до полного разрушения, не менее	Радиус губок при испытании на перегиб, мм	Число скручиваний фасонного провода вокруг оси до разрушения
	для медных проводов	для низколегированных проводов	для медных проводов	для низколегированных проводов			
30	405	410	1,5	1,5	3	10	—
40	395	400	2,0	2,0	3	10	—
50	395	400	2,5	2,5	3	10	—
65	380	390	3,0	3,0	3	13	4
85	375	385	3,5	3,0	3	16	4
100	370	385	4,0	3,5	3	18	4
120	365	375	4,0	3,5	3	18	4
150	360	370	4,0	3,5	3	20	4

Таблица 18.21. Механические свойства бронзовых контактных проводов

Номинальное сечение провода, мм²	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее				Относительное удлинение, %, не менее	Число перегибов и плоскости симметрии до полного разрушения, не менее	Радиус губок при испытании на перегиб, мм	Число скручиваний провода вокруг оси до разрушения
	Бронза с добавкой кадмия	Бронза с добавкой магния	Бронза с добавкой циркония	Бронза с добавкой магния и циркония				
65	440	430	450	440	3,0	3	13	5
85	440	430	450	440	3,0	3	16	5
100	430	420	440	430	3,5	3	16	5
120	420	410	430	420	4	3	18	5
150	410	400	420	410	4	3	20	5

20 °С должно быть не более 0,017 Ом·м для медных проводов, 0,0185 — для низколегированных, 0,0205 — для проводов из кадмиевой бронзы, 0,0220 — из магниевой бронзы, 0,0200 — из циркониевой бронзы, 0,0215 — из магниевациркониевой бронзы.

Механические свойства медных и низколегированных контактных проводов и бронзовых контактных проводов приведены в табл. 18.20 и 18.21 соответственно. Износостойкость контактных проводов должна соответствовать данным, приведенным в табл. 18.22.

Значения износостойкости бронзовых контактных проводов, изготовленных из трехкомпонентных сплавов, должны быть на 10—15 % выше, чем у проводов из циркониевой бронзы. Гарантийный срок эксплуатации при соблюдении потребителем условий хранения, транспортирования и применения (эксплуатации), для медных контактных проводов — не менее 6 лет, низколегированных — не менее 8 лет, бронзовых — не менее 15 лет.

Таблица 18.22. Износостойкость контактных проводов

Марки проводов	Допустимый износ контактных проводов, мм², не более, на 10 000 проходов токоприемников, оборудованных медными токосъемными пластинами, при потреблении тока электроподвижным составом в следующих диапазонах		
	1000 А	1000—2000 А	2000 А
МФ100	0,30	0,65	1,00
НЛФ100	0,25	0,58	0,85
БрМг0,25Ф	0,15	0,40	0,70
БрЦр0,5Ф	0,07	0,30	0,50
БрКд1Ф	0,13	0,35	0,60

18.7. ПРОФИЛИ ДЛЯ КОЛЛЕКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Профили для коллекторов электрических машин (рис. 18.5) изготавливаются из меди и из меди, легированной серебром. Медные коллекторные профили марки ПКМ изготавливаются по ГОСТ 3568-83. Химический состав дол-

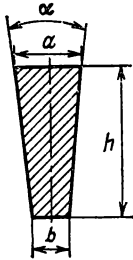


Рис. 18.5. Форма медного профиля для коллекторов электрических машин

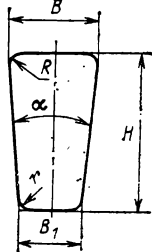


Рис. 18.6. Форма профиля из меди, легированной серебром, для коллекторов электрических машин

жен соответствовать меди марок М00, М06 и М1 по ГОСТ 859-78. Профили из меди марок М00, М06 и М1 должны изготавливаться из слитков по ГОСТ 193-79. Предельные отклонения медных трапецидальных профилей должны соответствовать указанным в табл. 18.23.

Номинальные размеры поперечного сечения профиля должны соответствовать требованиям заказчика. В заказе указываются также угол α и номинальные толщины сторон

Таблица 18.23. Предельные отклонения медных коллекторных профилей, мм

Толщина стороны профиля	Предельные от- клонения по толщине профиля			Высота профиля <i>h</i>	Предельные отклонения по высоте профиля
	Точность изготовления				
	высокая	повышен- ная	норма ль- ная		
≤ 3	—0,020	—0,04	—0,06	18	—0,2
Свыше 3 до 6 включительно	—0,025	—0,05	—0,08	18—30	—0,3
Свыше 6 до 10 включительно	—0,030	—0,06	—0,10	30—50	—0,5
Свыше 10 до 18 включительно	—0,035	—0,07	—0,12	50—80 80—125	—0,6 —1,0

профиля a и b . Коллекторные профили поставляются в полосах длиной 1—1,5 м. Точность изготовления профиля проверяется с помощью шаблона. Боковые стороны профиля при введении его в шаблон должны плотно прилегать к сторонам шаблона. Плотность прилегания проверяется щупом по ГОСТ 882-75 размером $0,03 \times 10,0$ мм при $h < 50$ мм или щупом размером $0,05 \times 10,0$ мм при $h > 50$ мм. При проверке щуп не должен проходить между сторонами профиля и шаблона.

Серповидность сторон профилей при высоте более 50 мм не должна превышать 3 мм на 1 м длины, а при высоте до 50 мм — 4 мм на 1 м длины. Для профилей высотой менее 30 мм и профилей, поставляемых в бухтах (это допускается по соглашению сторон), серповидность не нормируется. Число Бринелля для профилей в состоянии поставки должно быть не менее 80—84, а для профилей любой точности изготовления высшей категории качества — не менее 90—95.

Профили для коллекторов электрических машин из меди, легированной серебром, марки ПКМС выпускаются по ТУ 16-501.013-73. Форма поперечного сечения профиля должна соответствовать указанной на рис. 18.6. Радиусы скругления углов, образованных основаниями и боковыми сторонами профиля, не нормируются. Номинальные размеры поперечного сечения профилей должны быть указаны на чертеже заказчика. Сечение профиля рассчитывают по формуле

$$S = \frac{B + B_1}{2} H.$$

Профили выпускаются в диапазоне сечений от 160 до 900 мм²; размеры профилей: $B_1 \geq 2,0$ мм, $H = 35 \div 115$ мм; $\alpha \leq 4^\circ$. Предельные отклонения по стороне профиля B и высоте H должны соответствовать указанным в табл. 18.24.

Профили должны поставляться в полосах длиной не менее 2,0 м. По согласованию сторон допускается поставка профилей в бухтах.

Для изготовления профилей используются медные слитки, легированные серебром, по ТУ 48-21-137-76.

Форма и поперечные размеры профиля должны соответствовать шаблону, изготавли-

Таблица 18.24. Предельные отклонения коллекторных профилей из меди, легированной серебром, мм

<i>B</i>	Предельные отклонения по <i>B</i>			<i>H</i>	Предельные отклонения по <i>H</i>
	Точность изготовления				
	высокая	повышенная	нормальная		
≤3	—0,020	—0,04	—0,06	35—85	—0,5
Свыше 3 до 6 включительно	—0,025	—0,05	—0,08	85—95	—0,8
Свыше 6 до 10 включительно	—0,025	—0,06	—0,10	95—115	—1,0

мому заказчиком. Способ проверки аналогичен применяемому при проверке медных коллекторных полос. При этом в технических условиях оговаривается глубина проникновения щупа в зазор между профилем и шаблоном.

Серповидность профилей не должна превышать: для профилей высокой точности изготовления — 1,5 мм на 1 м длины; для профилей повышенной и нормальной точности изготовления — 3 мм на 1 м длины. Твердость профилей в состоянии поставки должна быть не менее указанной в табл. 18.25.

Таблица 18.25. Твердость коллекторных профилей из меди, легированной серебром

Точность изготовления профилей	Диапазон сечений, мм ²	H , не более	α , не более	Число Бринелля в состоянии поставки, не менее
Высокая	470	101	2°	90
	470	115	4	84
Повышенная	900	115	4	80
Нормальная	900	115	4	80

После нагревания профилей до 300 °С, выдержки в течение 1 ч и последующего охлаждения до температуры окружающей среды твердость полос не должна снижаться более чем на 5 единиц по сравнению со значениями, регламентированными в ТУ для полос в состоянии поставки.

Для профилей с числом твердости по Бринеллю в состоянии поставки не менее 90 предел прочности при растяжении должен быть не менее 300 МПа, относительное удлинение — не менее 5 %. После нагревания до 300 °С и последующего охлаждения предел прочности при растяжении и относительное удлинение должны быть не менее 280 МПа и 7 % соответственно.

18.8. КОНСТРУКЦИИ И МАРКИРОВКА СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Конструкции силовых кабелей на напряжения 1—35 кВ изображены на рис. 18.7, 18.8 (пояснения даны в подписях к рисункам). Жи-

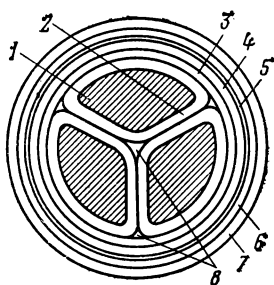


Рис. 18.7. Кабель с бумажной пропитанной изоляцией на напряжения 1–10 кВ:

1 — медная или алюминиевая токопроводящая жила; 2 — фазная изоляция; 3 — поясная изоляция; 4 — свинцовая или алюминиевая оболочка; 5 — подушка под броней; 6 — броня; 7 — защитные покрытия; 8 — заполнение

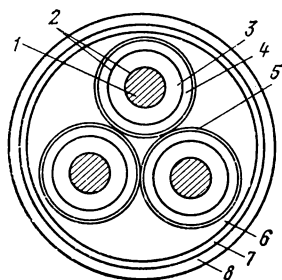


Рис. 18.8. Кабель на напряжения 20 и 35 кВ:

1 — токопроводящая жила; 2 — полупроводящие экраны; 3 — изоляция; 4 — свинцовая оболочка; 5 — подушка; 6 — заполнение; 7 — броня; 8 — защитные покрытия

лы выполняются многопроволочными и однопроволочными. В случае однопроволочных жил в маркировке кабелей добавляется обозначение «ож».

Кабели с изоляцией из бумажных лент, пропитанных маслокапильным составом, изготавливаются в соответствии с ГОСТ 18410-73. При напряжениях 1, 3, 6 и 10 кВ конструкции кабелей соответствуют рис. 18.7, а при напряжениях 20 и 35 кВ — рис. 18.8. При прокладке кабелей на вертикальных и крутонаклонных трассах возможно перемещение пропитывающего состава вдоль кабеля. Поэтому для таких трасс изготавливаются кабели с обедненно-пропитанной изоляцией (ГОСТ 18410-73) и с нестекающим пропитывающим составом (ГОСТ 18409-73).

Кабели с резиновой изоляцией изготавливаются в соответствии с ГОСТ 433-73 (рис. 18.9).

Кабели с пластмассовой изоляцией изготавливаются: на напряжения 0,66–6 кВ в соответствии с ГОСТ 16442-80 и на напряжение 10 кВ — в соответствии с ТУ МИ 344-74. Кабели с полиэтиленовой изоляцией могут изготавливаться также на напряжение 35 кВ.

Конструкция кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение до 6 кВ соответствует рис. 18.9, но в ней отсутствует скрепляющая лента 3, а на напряжения 10 и 35 кВ — рис. 18.8, в которой 4 — оболочка из поливинилхлоридного пластика, под которую прокладывается дополнительный экран из медных лент.

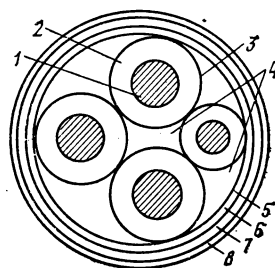


Рис. 18.9. Кабель с резиновой изоляцией:
1 — токопроводящая жила; 2 — изоляция; 3 — обмотка прорезиненной лентой; 4 — заполнение; 5 — обмотка прорезиненной лентой; 6 — оболочка; 7 — броня; 8 — защитные покрытия

Для открытой прокладки плотной группой рекомендованы кабели марок ВБВ и АВБВ (ТУ 16.505-836-78). Эти кабели имеют дополнительный сердечник между жилами из поливинилхлорида, шланговую оболочку, броню из стальных лент и дополнительную оболочку из поливинилхлорида поверх брони. Сечения и количество жил для этих кабелей приведены в табл. 18.26. Рабочее напряжение 660 В при частоте 50 Гц или постоянное 1000 В.

Таблица 18.26. Сечение и число жил кабелей марок ВБВ и АВБВ

Показатель	ВБВ	АВБВ
Число жил	2	3 и 4
Сечение, мм ²	1,5–50	1,5–95
	2	3 и 4
	2,5–50	2,5–120

Конструкция кабелей на напряжения 110 и 220 кВ изображена на рис. 18.10 (ГОСТ 16441-78). Эти кабели изготавливаются с изоляцией из бумажных лент различной плотности, пропитанных высоковольтным нефтяным или синтетическим маслом малой вязкости. Маслопроводящий канал этих кабелей через специальные муфты периодически по трассе прскладки соединяется с баками, давление в которых может достигать 0,3 МПа.

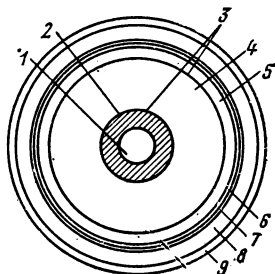


Рис. 18.10. Кабель с бумажной пропитанной изоляцией (маслонаполненный) на напряжения 110 и 220 кВ:

1 — маслопроводящий канал; 2 — токопроводящая жила, скрученная из фазонных луженых проволок; 3 — экран из двух-трех лент полупроводящей бумаги; 4 — изоляция; 5 — металлическая оболочка; 6 — подушка из поливинилхлоридных лент; 7 — медные усиливающие ленты; 8 — броня; 9 — защитные покрытия

Кабели на напряжения 110—525 кВ прокладываются также в трубопроводе с маслом под избыточным давлением (ГОСТ 16441-78). Каждая из трех фаз такого кабеля снаружи имеет экран из медных лент. На такой кабель предварительно накладывается свинцовая оболочка, которая непосредственно перед прокладкой в металлический трубопровод удаляется. Внутренний диаметр трубопровода соответствует 2,85 диаметра отдельной фазы. Давление масла достигает 1,5 МПа. К месту прокладки кабель может доставляться также без оболочки в специальном контейнере.

Буквенные обозначения в маркировке кабелей приведены в табл. 18.27. Они определяются конструкцией брони и защитных покрытий.

Так, марка СБ обозначает кабель с бумажной пропитанной изоляцией с медными жилами в свинцовой оболочке (С) с броней из

Таблица 18.27

Буква или сочетание букв	Значение буквы или сочетания букв
А	Алюминиевая жила
АС	Алюминиевая жила и свинцовая оболочка
АА	Алюминиевая жила и алюминиевая оболочка
Б	Броня из двух стальных лент с антикоррозионным защитным покрытием
Бн	То же, но с негорючим защитным покрытием (не поддерживающим горение)
Г	Отсутствие защитных покрытий поверх брони или оболочки
л (2л)	В подушке под броней имеется слой (два слоя) из пластмассовых лент
в (п)	В подушке под броней имеется выпрессованный шланг из поливинилхлорида (полиэтилена)
Шв (Шп)	Защитный покров в виде выпрессованного шланга (оболочки) из поливинилхлорида (полиэтилена)
К	Броня из круглых оцинкованных стальных проволок, поверх которых наложен защитный покров
н	Не поддерживающий горение защитный покров
П	Броня из оцинкованных плоских проволок, поверх которых наложен защитный покров
С	Свинцовая оболочка
О	Отдельные оболочки поверх каждой фазы
В—в конце обозначения через черточку	Обеденно-пропитанная бумажная изоляция
Ц	Бумажная изоляция, пропитанная нестекающим составом, содержащим церезин
НР	Резиновая изоляция и оболочка из резины, не поддерживающей горение
В	Изоляция или оболочка из поливинилхлорида
П	Изоляция или оболочка из термопластичного полиэтилена
Пс	Изоляция или оболочка из самозатухающего полиэтилена (не поддерживающего горение)
Пв	Изоляция из вулканизированного полиэтилена
Бб	Броня из профилированной стальной ленты
У	Для кабелей, изготовленных после 01.04.85. Изоляция может работать при температурах 80, 70, 65 °С соответственно для кабелей на напряжения 6, 10, 20 и 35 кВ

стальных лент (Б) с защитными покрытиями из кабельной пряжи, пропитанной битумом; СБГ—то же, но без защитных покрытий («голый»); СГ—то же, но без брони и защитных покрытий; АСБ—то же, что СБ, но с алюминиевой жилой; ААБ—то же, но с алюминиевой оболочкой (А вместо С).

Марка ОСБ—кабель с отдельно освинцованными жилами (см. рис. 18.8) с броней из стальных лент с защитными покрытиями.

Марка ААШв—кабель с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке и защитным покрытием в виде шланга из поливинилхлорида.

Марка ААБв—кабель с выпрессованной оболочкой из поливинилхлорида (в) под броней из стальных лент (Б) с защитными покрытиями.

Марка СРБ—кабель с резиновой изоляцией, свинцовой оболочкой, с броней из стальных лент и защитными покрытиями.

Марка ВВГ—кабель с изоляцией из поливинилхлорида, оболочкой из поливинилхлорида.

Марка ПВГ—то же, но с изоляцией из термопластичного полиэтилена.

Марка ПсВГ—то же, но с изоляцией из самозатухающего полиэтилена без защитных покрытий; ПвВГ—то же из полиэтилена вулканизированного.

Марка ПОВБ—кабель с полиэтиленовой изоляцией, фазы которого заключены в отдельные экраны из медных лент и поливинилхлоридные оболочки в общей ленточной броне, с защитными покрытиями.

Бронепокровы, выполненные из двух стальных лент, применяются при отсутствии значительных растягивающих усилий для всех видов прокладки, кроме прокладки в воде.

Круглые стальные оцинкованные проволоки диаметром 4—6 мм применяются при прокладке в воде.

Плоские стальные оцинкованные проволоки толщиной 1,5—1,7 мм применяются при прокладке в земле или в воздухе при наличии значительных растягивающих усилий.

Подушка под броней выполняется в виде слоя кабельной пряжи, пропитанной битумом. В кабелях с алюминиевой оболочкой применяется дополнительная подмотка одной лентой из поливинилхлоридного пластика. При прокладке в агрессивных (коррозионно-активных) грунтах применяется подмотка из двух лент. Усиление подушки может производиться выпрессовыванием оболочки из поливинилхлорида или полиэтилена.

Нормальный защитный антикоррозионный покров состоит из слоя битума и кабельной пряжи, пропитанной битумом и противогнистыми составами, и покрытия, предохраняющего витки кабеля на барабане от сплипания.

Негорючий наружный покров состоит из поливинилхлоридной оболочки или стеклянной пряжи, пропитанной негорючим составом. При высокой коррозионной активности грунта предусмотрен защитный покров в виде поливинилхлоридного шланга (или самозатухающего полиэтилена). Наружный покров состоит из битумного состава, пластмассовой ленты и шланга.

Ассортимент изготавливаемых кабелей приведен в табл. 18.28—18.33. Наружные диаметры кабелей приведены в табл. 18.34—18.39.

Т а б л и ц а 18.28. Номенклатура силовых кабелей

Марка	Число жил	Номинальное напряжение кабелей, кВ					
		1	3	6	10	20	35
		Номинальное сечение жил, мм ²					
АА, АСГ, СГ, ААШв, ААШп	1	10—800	10—625	—	—	15—400	120—300
ААБлГ, ААБл, ААБ2л, ААБ2лШв, ААБ2лШп, АСБ, СБ, АСБл, СБл, АСБ2л, СБ2л, АСБн, СБн, АСБлн, СБлн, АСБГ, СБГ	1	10—800	10—625	—	—	—	—
ААПлГ, АСП, СП, ААПл, ААП2л, АСПл, СПл, АСП2л, СП2л, АСПлн, СПлн, АСПГ, СПГ, ААПлШв	1	50—800	35—625	—	—	—	—
ААП2лШв-В, ААБл-В, ААШв-В, ААБ2л-В, АСБ-В, АСБн-В, АСБлн-В, АСБл-В, СБ2л-В, СБ-В, СБл-В, СБн-В, АСБл-В	1	10—600	10—500	—	—	—	—
АСБГ-В, СБГ-В	1	10—625	—	—	—	—	—
АСБ2лГ-В, СБ2лГ-В	1	—	240—625	—	—	—	—
ААПл-В, ААПлГ-В, АСП-В, СП-В, АСПл-В, СПл-В, АСП2л-В, СП2л-В, АСПлн-В, СПлн-В, АСПГ-В, СПГ-В	1	50—500	35—500	—	—	—	—
АСП2лГ-В, СП2лГ-В	1	—	240—625	—	—	—	—
АСК, СКл, ЦААШв, ЦСШв, ЦАСШв	1	—	—	—	—	—	120—300
ААБл, ААБл-В, АСБ, СБ, АСБ-В, СБ-В, АСБл, СБл, АСБл-В, СБл-В, АСП2л, СП2л, АСПл, СПл, СКл, АСКл	1*—основная и 2—контро- льные	240—800+ +2×1	—	—	—	—	—
АСГ, СГ, АСБ, СБ, АСБл, СБл, СБ2л, АСБ2л, АСБн, СБн, АСБлн, СБлн, АСБГ, СБГ	2	6—150	—	—	—	—	—
АСП, СП, АСПл, СПл, АСП2л, СП2л, АСПГ, СПГ	2	25—150	—	—	—	—	—
АСБ-В, СБ-В, АСБл-В, СБл-В, АСБн-В, СБн-В, АСБлн-В, СБлн-В, АСБГ-В, СБГ-В, АСБ2л-В, СБ2л-В	2	6—120	—	—	—	—	—
АСП-В, СП-В, АСПл-В, СПл-В, СПГ-В, АСПГ-В, АСП2л-В, СП2л-В	2	25—120	—	—	—	—	—
ААГ, ААШв, ААШп, ААБл, ААБ2лШв, ААБ2лШп, ААБлГ, ААБ2л, АСГ, СГ, АСШв, АСБ, СБ, АСБл, СБл, АСБн, СБн, АСБлн, СБлн, АСБГ, СБГ, АСБ2л, СБ2л, АСБ2лШв, СБ2лШв, АСБ2лГ, СБ2лГ	3	6—240	6—240	10—240	16—240	—	—
СШв, СБШв	3	16—240	—	10—240	16—240	—	—
ААПл, ААП2л, ААПлГ, ААП2лГ, ААП2лШв, АСП, СП, АСПл, СПл, АСП2л, СП2л, АСПлн, СПлн, АСПГ, СПГ, АСКл, СКл, АСП2лГ, СП2лГ	3	25—240	25—240	16—240	16—240	—	—

Продолжение табл. 18.28

Марка	Число жил	Номинальное напряжение кабелей, кВ					
		1	3	6	10	20	35
		Номинальное сечение жпл, мм ²					
СПШв	3	25—240	—	16—240	16—240	—	—
АОСБ, ОСБ, АОСБн, ОСБн, АОСБГ, ОСБГ	3	—	—	—	—	—	120—150
АОСК, ОСК	3	—	—	—	—	25—185	120
ААШв-В, ААП2лШв-В, ААБл-В, ААБ2л-В, АСБ-В, СБ-В, АСБл-В, СБл-В, АСБн-В, СБн-В, ААГ-В, АСБлн-В, СБлн-В, АСБГ-В, СБГ-В, АСБ2л-В, СБ2л-В, ААШв-В, ААБлГ-В	3	6—120	6—120	16—120	—	—	—
ААБв, ААБвГ	3	—	—	10—240	16—240	—	—
ААШв-В, ААБлГ-В, АСБГ-В, СБГ-В, АСПГ-В, СПГ-В, АСП2л-В, СП2лГ-В	3	185—240	—	—	—	—	—
ААПл-В, ААПлГ-В, АСП-В, СП-В, СПл-В, АСПл-В, АСПлн-В, СПлн-В, АСП2л-В, СП2л-В	3	25—150	25—150	16—120	—	—	—
ЦААБл, ЦААБ2л, ЦААБШв, ЦААБШп, ЦААБлГ, ЦААБлн, ЦААПл, ЦААП2л, ЦААПлГ, ЦААПлн, ЦААПлШв, ЦААШв, ЦАСБ, ЦСБ, ЦАСБГ, ЦСБГ, ЦАСБн, ЦСБн, ЦСПв, ЦАСШв, ЦАСБШв, ЦСПШв, ЦСБШв, ЦАСП, ЦАСПл, ЦСБл, ЦСП, ЦАСПГ, ЦСПГ, ЦАСПн, ЦСПн, ЦАСБл, ЦАСПШв, ЦАСПл, ЦСПл, ЦАСКл, ЦСКл, ЦААБв, ЦААБвГ	3	—	—	25—185	25—185	—	—
ЦАОСБ, ЦОСБ, ЦАОСБГ, ЦОСБГ	3	—	—	—	—	—	120—150

* Для сетей электрифицированного транспорта.

Примечание. Для кабелей, изготовленных после 1 апреля 1985 г., к обозначению марки кабелей добавляется буква У. Например, СБУ, ААГУ, ЦААБЛУ, СПЛУ-В. В этих кабелях допускается более высокая температура жилы, при этом увеличивается допустимый ток нагрузки (см. примечания к табл. 18.51).

Таблица 18.29. Четырехжильные силовые кабели на напряжение 1 кВ*

Обозначение марок	Сечение жил, мм ²
ААГ, ААШп, ААШв, ААЕлГ, ААП2лШв, ААБл, ААБ2л, АСГ, СГ, АСБ, СБ, АСБл, СБл, АСБн, СБн, АСБлн, СБлн, АСБГ, СБГ, АСБ2л, СБ2л, АСПв, СШв, СБШв	10—185**
ААПл, ААП2л, ААПлГ, АСП, СП, АСПл, СПл, АСПлн, СПлн, АСПГ, СПГ, АСП2л, СПШв	16—185**
АСКл, СКл	25—185**
ААШв-В, ААП2лШв-В, ААБл-В, ААБ2л-В, АСБ-В, СБ-В, АСБл-В, СБл-В, АСБн-В, СБн-В, АСБлн-В, АСБ2л-В, СБ2л-В	10—120
ААБлГ-В	16—120
АСБГ-В, СБГ-В	10—185
ААПл-В, ААПлГ-В, СП-В, АСП-В, АСПл-В, СПн-В, АСПлн-В, СПлн-В, АСПГ-В, СПГ-В, АСП2л-В, СП2л-В	16—120

* Четырехжильные кабели в алюминиевой оболочке фактически не изготавливаются. Вместо них применяют трехжильные кабели, а вместо жилы зануления используют оболочку.

** Жилы одинакового сечения до 120 мм² жлужительно.

Таблица 18.30. Сечение нулевой жилы для конструкций с уменьшенным сечением этой жилы в четырехжильных кабелях

Сечение основных жил, мм ²	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185
Сечение нулевой жилы, мм ²	6	10	16	16	25	25	35	35	50	50

Таблица 18.31. Число жил и сечения кабелей с резиновой изоляцией

Марка кабеля	Число основных жил	Переменное 660 (постоянное 1000) В	Номинальное постоянное напряжение кабеля, В		
			3000	6000	10 000
			Номинальное сечение жил, мм ²		
СРГ	1	1—240	1,5—500	2,5—500	240—400
АСРГ	1	4—300	4—500	4—500	240—400
СРГ	2 и 3	1—185	—	—	—
АСРГ	2	4—240	—	—	—
АСРГ	3	2,5—240	—	—	—
ВРГ, НРГ	1—3	1—240	—	—	—
АВРГ, АНРГ	1	4—300	—	—	—
АВРГ, АНРГ	2 и 3	2,5—300	—	—	—
СРБГ, АСРБГ	1	—	240, 400, 500	—	—
СРБГ, АСРБГ	1	—	—	95, 240, 400, 500	—
СРБ, СРБГ, ВРБн, ВРБ, ВРБГ, НРБ, НРБГ	2 и 3	2,5—185	—	—	—
АСРБ, АСРБГ, АВРБ, АВРБн, АВРБГ, АНРБ, АНРБГ	2	4—240	—	—	—
	3	2,5—240	—	—	—

Примечание. Двух- и трехжильные кабели могут быть изготовлены с дополнительной заземляющей или нулевой жилой.

Таблица 18.32. Основные марки и параметры одножильных маслонаполненных кабелей 110, 150, 220, 330, 500 кВ с медными токопроводящими жилами

Марка кабеля	Характеристика конструкции и производственное назначение	Напря- жение, кВ	Изготавливается серийно с сечением жилы, мм ²
<i>Маслонаполненные низкого давления с центральным маслопроводящим каналом</i>			
МНАШв (МНАГШв)	В гладкой или гофрированной алюминиевой оболочке, в шланге из поливинилхлоридного пластика, предназначенный для прокладки в туннелях и каналах зданий	110	120, 150, 185, 240 (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
МНАШву (МНАГШву)	В гладкой или гофрированной алюминиевой оболочке в шланге из поливинилхлоридного пластика с усиленным защитным слоем под шлангом, предназначенный для прокладки в земле (в траншеях), если кабель не подвергается растягивающим усилиям и защищен от механических повреждений во время прокладки и в эксплуатации, например прокладка в железобетонных лотках	110	120, 150, 240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
МНС	В свинцовой оболочке с упрочняющим покровом и с защитным покровом из лент поливинилхлоридного пластика, предназначенный для прокладки в туннелях и каналах зданий	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		150	240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		220	300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
МНСА	В свинцовой оболочке с упрочняющим покровом и с защитным покровом из слоев битумного состава, полиэтилентерефталатных (или резиновых) лент и пропитанной кабельной пряжи (или стеклопряхи), предназначенный для прокладки в земле (в траншеях), если кабель не подвергается растягивающим усилиям и защищен от механических повреждений	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		150	240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		220	300, (350), 400, 500, 625, 800
МНСК	В свинцовой оболочке с упрочняющим покровом, с подушкой, с броней из круглых стальных оцинкованных проволок, с наружным покровом из слоев битумного состава, полиэтилентерефталатных лент (или резиновых лент) и пропитанной кабельной пряжи (или стеклопряхи), предназначенный для прокладки под водой, где требуется дополнительная механическая защита кабеля	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		150	240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		220	300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
МНСШв	В свинцовой оболочке с упрочняющим покровом, в шланге из поливинилхлоридного пластика, предназначенный для прокладки в земле (в траншеях), если кабель не подвергался растягивающим усилиям и защищен от механических повреждений, а также в туннелях и каналах зданий	110	120, 150, 185, 240, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		150	250, (270), 300, (350), 400, 500, (550), 625, 800
		220	300, (350), 400, 500, (550), 625, 800

Продолжение табл. 18.32

Марка кабеля	Характеристика конструкции и производственное назначение	Напря- жение, кВ	Изготавливается серийно с сечением жилы, мм ²
<i>Маслонаполненные высокого давления в трубопроводе</i>			
МВДТ	Во временной свинцовой оболочке, снимаемой на месте прокладки при протягивании в трубопровод, предназначенный для эксплуатации в стальном трубопроводе с маслом под давлением, прокладываемый в туннелях, в земле и под водой	110 220 330 380 500 110	120, 150, 185, 240, (270), 300, 400, 500, (550), 625, (700) 300, 400, 500, (550), 625, (700) 400, 500, (550), 625, (700) 400, 500, (550), 625, (700) (550), 625, 700
МВДТк	В контейнере с маслом, предназначенный для эксплуатации в стальном трубопроводе с маслом под давлением, прокладываемый в туннелях, в земле и под водой	110 220 330 380 500	120, 150, 185, 240, (270), 300, 400, 500, (550), 625, 700 300, 400, 500, (550), 625, (700) 400, 500, (550), 625, (700) 400, 500, (550), 625, (700) (550), 625, (700)

Примечания: 1. Кабели, имеющие сечения, указанные в скобках, должны изготавливаться по согласованию между потребителем и предприятием-изготовителем.

2. К марке кабеля, пропитанного синтетическим маслом, добавляется буква «с».

Таблица 18.33. Силовые кабели с пластмассовой изоляцией

Обозначение марки кабеля	Число жил	Номинальное напряжение, кВ			
		0,66	1	3	6
ВВГ, ПВГ, ПсВГ, ПвВГ АВВГ, АПВГ, АПсВГ, АПвВГ АВБбШв, ВБбШв, АПБбШв, ПвБбШв, АПсБбШв, ПсБбШв, АПвБбШв, ПвБбШв	1, 2, 3, 4 1, 2, 3, 4 2, 3, 4	1,5—50 2,5—60 4—60	1,5—240 2,5—240 6—240	— — 6—240	— — —
АВАШв, ВАШв, АПвШв, ПвАШв АВВГ, ВВГ, АПВГ, ПВГ, АПсВГ, ПсВГ, АПВГ, ПВГ, АВБбШв, ВБбШв, АПБбШв, ПБбШв, АПсБбШв, ПсБбШв, АПвБбШв, ПвБбШв	3, 4 3	— —	6—240 —	6—240 —	10—240 10—240
ВВГ, ПВГ, ПсВГ, ПвВГ АВВГ, АПВГ, АПсВГ, АПвВГ	5 5	— —	1,5—25 2,5—35	— —	— —

Таблица 18.34. Размеры и максимальные строительные длины трехжильных кабелей с отдельно оцинкованными жилами

Сечение жилы, мм ²	Наружный диаметр, мм				Строительная длина, м		Сечение жилы, мм ²	Наружный диаметр, мм				Строительная длина, м		
	20 кВ		35 кВ					20 кВ		35 кВ				
	ОСБ	ОСК	ОСБ	ОСК	20 кВ	35 кВ		ОСБ	ОСК	ОСБ	ОСК	20 кВ	35 кВ	
25	64	79	—	—	300	—		95	78	93	96	111	150	250
35	67	81	—	—	350	—		120	87	92	91	106	250	250
50	71	85	—	—	325	—		150	80	96	94	—	250	250
70	74	89	92	106	300	300		185	85	100	—	—	250	—

Таблица 18.35. Размеры и максимальные строительные длины трехжильных кабелей с поясной изоляцией в свинцовой оболочке

Сечение жины, мм ²	Наружный диаметр, мм												Строительная длина, м		
	1 кВ				6 кВ				10 кВ						
	СГ	СБ	СБГ	СК	СГ	СБ	СБГ	СК	СГ	СБ	СБГ	СК	1 кВ	6 кВ	10 кВ
6	12	20	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	—	—
10	14	23	20	—	21	30	27	—	—	—	—	—	750	650	—
16	16	25	22	—	24	33	30	41	28	37	34	45	750	600	500
25	17	26	23	34	24	33	30	41	29	38	35	45	750	600	500
35	19	28	25	36	26	35	32	43	31	40	37	48	600	500	375
50	22	31	28	39	29	38	35	46	33	42	39	50	600	500	375
70	25	34	31	42	32	41	38	49	36	45	42	53	600	500	375
95	29	38	35	45	35	44	41	52	39	48	45	57	500	375	350
120	32	41	38	50	38	47	44	55	42	51	48	60	350	300	325
150	36	45	42	53	42	51	48	59	46	55	52	63	380	300	325
185	39	48	45	56	45	54	51	62	49	58	55	70	300	250	250
240	44	53	50	61	49	58	55	71	54	64	61	65	300	250	250

Таблица 18.36. Наружные диаметры, мм, трехжильных кабелей на 660 В с резиновой изоляцией для неподвижной прокладки

Сечение жилы, мм²	СРГ	СРБ	ВРГ, НРГ	Сечение жилы, мм²	СРГ	СРБ	ВРГ, НРГ	Сечение жилы, мм²	СРГ	СРБ	ВРГ, НРГ
1	9	17	11	10	18	26	20	70	34	45	39
1,5	10	18	12	16	20	28	22	95	40	50	44
2,5	11	18	13	25	24	34	27	120	43	54	47
4	12	19	14	35	26	37	29	150	47	58	52
6	13	20	15	50	31	41	34	185	52	63	57

Таблица 18.37. Основные геометрические размеры и массы маслонаполненных кабелей среднего давления с центральным маслопроводящим каналом и медной жилой на напряжение 110 кВ

Показатель	В алюминиевой оболочке				В свинцовой оболочке								
	МНАШву				МНСШв			МНСК			МНСА		
Сечение токопроводящей жилы, мм ²	150	185	240	270	150	270	625	150	270	625	150	270	625
Диаметр маслопроводящего канала, мм	12	12	12	12	12,4	13,4	14,5	12,4	13,4	14,5	12,4	13,4	14,5
Внешний диаметр кабеля, мм	58,2	58,8	60,6	60,6	59,4	60,7	70,5	63,8	84,5	94,1	61,6	62,9	73,5
Масса масла в кабеле, кг/км	600	630	670	670	694	709	890	694	709	890	694	709	890
Масса кабеля, т/км	5,2	5,7	6,4	6,7	10,4	11,8	17,7	19,6	21,0	28,2	10,5	12,2	17,7

Таблица 18.38. Основные геометрические размеры и массы маслонаполненных кабелей среднего давления с центральным маслопроводящим каналом и медной жилой на напряжение 220 кВ в свинцовой оболочке

Показатель	МНСШв			МНСК			МНСА		
Сечение токопроводящей жилы, мм	350	500	625	350	500	625	350	500	625
Диаметр маслопроводящего канала, мм	12,4	14,5	14,5	12,5	14,5	14,5	12,6	14,5	14,5
Внешний диаметр кабеля, мм	84,3	86,8	88,4	107,5	110	112	85,9	88,4	90,0
Масса масла в кабеле, кг/км	1610	1690	1690	1610	1690	1690	1610	1690	1690
Масса кабеля, т/км	19,4	21,4	23,6	31,7	33,6	36,4	19,4	21,4	23,6

Таблица 18.39. Основные геометрические параметры и массы маслонаполненных кабелей марки МВДТ с медной жилой во временной свинцовой оболочке

Параметры кабеля	110 кВ			220 кВ			380 кВ	525 кВ
Сечение жилы, мм²	270	425	700	300	550	700	550	625
Диаметр, мм:								
по временной свинцовой оболочке	56,5	60,8	67,7	79,3	82,1	84,9	97,4	107,4
по полукруглым проволокам	49,3	53,6	60,5	70,7	73,5	76,5	90,2	100,2
Масса, т/км:								
в свинцовой оболочке	10,1	13,1	17,0	17,9	20,6	22,7	25,3	29,6
при снятой свинцовой оболочке	4,4	7,0	10,0	8,5	11,0	12,6	13	15,6
Внутренний диаметр стального трубопровода, мм	150	150	199	199	199	199	253	253

Кабели с алюминиевыми жилами и оболочками и кабели с медными жилами и свинцовыми оболочками имеют практически одинаковые наружные диаметры. Наружный диаметр четырехжильных кабелей на напряжение 1 кВ на 1—4 мм больше, чем трехжильных.

Размеры кабелей с обедненно-пропитанной изоляцией на напряжение 6 кВ близки к размерам обычных кабелей на напряжение 10 кВ.

В соответствии с ТУ 16.705.212-81 изготавливаются одножильные силовые кабели с вулканизированной полиэтиленовой изоляцией на напряжение 64/110 кВ марок АПвВ, АПвП, АПвПс, сечения жил 350 и 625 мм².

18.9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Электрическое сопротивление токопроводящей жилы постоянному току при, Ом/км, температуре T , °С

$$R_t = \frac{\rho_{20}}{q} [1 + \alpha (T - 20)],$$

где q — номинальное сечение жилы, мм²; ρ_{20} — удельное сопротивление при 20 °С, нОм·м; α — температурный коэффициент сопротивления,

Таблица 18.40. Значение коэффициента возрастания сопротивления при переменном токе для медных жил

Сечение жилы, мм ²	Трехжильные кабели с поясной изоляцией	Три одножильных кабеля, расположенных вплотную по вершинам треугольника
150	1,01	1,006
183	1,02	1,008
240	1,035	1,0105
300	1,052	1,025
400	1,095	1,05
500	1,15	1,08
625	—	1,125
800	—	1,20
1000	—	1,29

равный для меди и алюминия приблизительно 0,004 °C⁻¹.

С учетом скрутки и нагартовки проволок в жиле ρ_{20} не должно превышать для меди и алюминия: при сечении жил до 500 мм² — 17,76 и 29,11 нОм·м, при сечении жил свыше 500 мм² — 17,93 и 29,4 нОм·м.

При расчете сопротивления жилы переменному току сопротивление жилы постоянному току следует умножить на коэффициент, приведенный в табл. 18.40 для меди. Для алюминиевых жил этот коэффициент несколько меньше. Для уменьшения сопротивления жил переменному току при больших сечениях жилы сечений 625 мм² и более изготавливаются секционированными.

Индуктивность кабеля при симметричной нагрузке фаз в трехфазной системе при расположении жил по углам равностороннего треугольника может быть вычислена по формуле, мГн/км,

$$L = L_1 + A \lg \frac{s}{r},$$

где s — расстояние между центрами жил; r — радиус круглой токопроводящей жилы, а для кабелей с секторными жилами — радиус круглой жилы, эквивалентной по сечению секторной (приближенно); $A = 0,463$ и $0,471$ для одно- и трехжильных (с секторными жилами) кабелей соответственно.

Значения коэффициентов L_1 приведены в табл. 18.41. Значения активного и индуктивного сопротивлений кабелей с поясной изоляцией на напряжения 6 и 10 кВ приведены в табл. 18.42.

Емкость кабеля с экранированными фазами или с отдельно оцинкованными жилами, Ф/м, вычисляется по формуле

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln R/r},$$

где R — радиус по изоляции; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ϵ_r — относительная диэлектрическая про-

Таблица 18.41. Коэффициент L_1 для расчета индуктивности кабелей

Число проволок в жиле	Одножильные кабели	Трехжильные кабели
3	0,0750	0,0766
7	0,0638	0,0650
10	0,0556	0,0567
37	0,0531	0,0543
61	0,0525	0,0535
Более 61	0,0502	0,0513

Таблица 18.42. Активное и индуктивное сопротивления трехжильных кабелей с поясной изоляцией

Сечение, мм ²	Активное сопротивление, Ом/км, при 20 °C		Индуктивное сопротивление, Ом/км, при напряжении	
	Алюминий	Медь	6 кВ	10 кВ
1,5	19,62	11,95	—	—
2,5	11,75	7,17	—	—
4	7,85	4,5	—	—
6	4,90	3,0	—	—
10	2,94	1,79	0,11	0,122
16	1,84	1,12	0,102	0,113
25	1,17	0,716	0,091	0,099
35	0,84	0,514	0,087	0,095
50	0,589	0,359	0,083	0,090
70	0,42	0,256	0,08	0,086
95	0,31	0,189	0,078	0,083
120	0,245	0,15	0,076	0,081
150	0,196	0,12	0,074	0,079
185	0,159	0,097	0,073	0,077
240	0,125	0,075	0,071	0,075

ницаемость изоляции (для бумажной изоляции $\epsilon_r = 3,5 \div 3,7$).

Емкостный ток в трехфазном кабеле при симметричном напряжении определяется емкостью C_p :

$$I_C = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \omega C_p l,$$

где $U_{ном}$ — номинальное линейное напряжение; ω — угловая частота (314 рад/с); l — длина линии.

Для кабелей, изготавливаемых по ГОСТ 18410-73, справедливы приближенные соотношения $C_1 = 0,865 C_p$; $C_2 = 1,68 C_p$, где C_1 — емкость одной жилы по отношению к двум другим, соединенным с металлической оболочкой; C_2 — емкость трех жил, соединенных вместе, по отношению к свинцовой оболочке.

Ток замыкания на землю при заземлении одной фазы кабельной сети в системе с изолированной нейтралью

$$I_3 \approx U_{ном} \omega \cdot 0,41 C_p l / \sqrt{3}.$$

Значения емкостей для различных конструкций кабеля с бумажной пропитанной изоля-

Таблица 18.43. Рабочая емкость C_p , мкФ/км, трехжильных кабелей с поясной изоляцией в трехфазных цепях с симметричным напряжением

Напряжения, кВ	Сечение жилы, мм ²										
	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
1	0,35	0,4	0,5	0,53	0,63	0,72	0,77	0,81	0,86	0,87	—
6	0,2	0,23	0,28	0,31	0,36	0,4	0,42	0,46	0,51	0,53	0,53
10	—	—	0,26	0,27	0,29	0,31	0,35	0,37	0,44	0,45	0,46

Таблица 18.44. Емкость, мкФ/км, одножильных кабелей и фазы трехжильных кабелей с отдельно свинцованными жилами с бумажной пропитанной изоляцией

Напряже- ние, кВ	Сечение жилы, мм ²										
	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400
20	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26	0,32	0,35	0,38	0,42	0,46	0,51
35	—	—	—	0,18	0,20	0,24	0,26	0,28	0,31	0,33	—

Таблица 18.45. Емкость фазы маслонаполненных кабелей

Тип кабеля	Напряже- ние, кВ	Сечение, мм ²	Толщина изоляции, мм	Емкость, мкФ/км
Маслонаполненный с центральной маслопро- водящим каналом	110	150	11,0	0,25
		270	10,0	0,33
		625	9,6	0,45
	220	350	20,0	0,22
		500	18,8	0,27
		625	18,0	0,28
Маслонаполненный для затягивания в стальной трубопровод	110	270	10,7	0,30
		425	10,0	0,37
		700	9,6	0,46
	220	300	20,7	0,20
		550	18,1	0,28
		700	17,5	0,29
	380	550	26	0,21
	525	625	30	0,19

ций и маслонаполненных приведены в табл. 18.43—18.45.

18.10. СПОСОБЫ ПРОКЛАДКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Области применения силовых кабелей различных конструкций устанавливаются в зависимости от агрессивности и пожароопасности окружающей среды, механических условий при монтаже и эксплуатации. При определении областей применения кабелей учитываются требования Правил устройства электроустановок (ПУЭ), Строительных норм и правил (СНиП).

Применение кабелей с медными жилами предусмотрено только для специальных целей, например во взрывоопасных помещениях, в шахтах, опасных по газу и пыли. Предусматривается также широкое использование кабелей в алюминиевой оболочке и кабелей с пластмассовой изоляцией взамен кабелей в свинцовой оболочке. Применение кабелей в свинцовой оболочке предусмотрено лишь для подводной прокладки, прокладки в угольных и сланцевых шахтах, в особо опасных коррозионно-активных средах. В остальных случаях выбор кабелей в свинцовой оболочке подлежит специальному техническому обоснованию.

При наличии опасности механических повреждений следует применять кабели с ленточной броней, а при наличии продольных растягивающих усилий — с броней из круглых проволок. В сильно агрессивной среде в грунте и трубах следует применять кабели с усиленными защитными антикоррозионными по-

кровыми (л, 2л, в. — см. табл. 18.27, 18.28). Методы определения показателей активности сред определены в ГОСТ 9.015-74 «Единая система защиты от коррозии и старения. Подземные сооружения. Общие технические требования».

Наименьшие радиусы изгиба кабелей при прокладке приведены в табл. 18.46а и 18.46б.

Таблица 18.46а. Наименьшие допустимые радиусы изгиба силовых кабелей и изолированных жил

Тип и конструкция кабеля	Кратность радиуса внутренней кривой изгиба	
	кабеля по отноше- нию к его наружно- му диа- метру	жилы по отно- шению к ее диаметру в изоляции
Кабели одножильные в свинцовой оболочке с бумажной изоляцией бронированные и небронированные	25	10
Кабели многожильные в свинцовой оболочке с бумажной изоляцией бронированные и небронированные	15	10
Кабели многожильные в алюминиевой оболочке с бумажной изоляцией бронированные и небронированные	25	10
Кабели с резиновой изоляцией:		
небронированные	10	3
бронированные	15	3
Кабели с пластмассовой изоляцией:		
в пластмассовой оболочке, не имеющие брони, и кабели без стальной гофрированной или алюминиевой оболочки	6	3
бронированные, не имеющие брони, и кабели без стальной гофрированной оболочки	10	3

Таблица 18.46б. Допустимые радиусы изгиба стального трубопровода, предназначенного для протягивания строительных длин маслонаполненных кабелей высокого давления, и максимальные строительные длины

Число изгибов стального трубопровода между двумя колодцами	≤2÷3
Минимальный радиус изгиба стального трубопровода на участке между двумя муфтами	8 м
Минимальный радиус изгиба медной трубы в разветвительной муфте	2 м
Максимальное расстояние между двумя колодцами (соединительными муфтами):	
при протягивании кабелей, армированных двумя проволоками скольжения	400—600 м
при протягивании в сплошной проволочной броне	1200 м

Таблица 18.47. Максимально допустимые разности уровней без применения стопорных муфт (по ГОСТ 18410-73)

Напряже- ние, кВ	Изоляция	Кабели	Разность уровней, м (не более)
1	С вязкой пропиткой	Небронированные: в алюминиевой оболочке в свинцовой оболочке	25 20 25
	Обедненно-пропитанная	Бронированные в алюминиевой оболочке в свинцовой оболочке	Без ограничения при усло- вии промежуточных креп- лений 100
6	С вязкой пропиткой	В алюминиевой оболочке	20
	Нестекающая	В свинцовой оболочке	15
	Обедненно-пропитанная	В алюминиевой или свинцовой обо- лочке То же	Без ограничения 100
10	С вязкой пропиткой	В алюминиевой или свинцовой обо- лочке	15
	Нестекающая		Без ограничения
20 и 35	С вязкой пропиткой	В алюминиевой или свинцовой обо- лочке	5*
	Нестекающая		Без ограничения

* Разность уровней стояков у концевых муфт (с учетом периодической замены кабеля)—не более 15 м.

Таблица 18.48. Допустимые усилия тяжения для кабелей на напряжение 35 кВ марки ОСБ

Сечение кабеля, мм ²	Допустимые усилия тяжения за жилы, кН
3×70	8,2
3×95	10,8
3×120	13,7
3×150	17,6

При прокладке кабелей с бумажной пропитанной изоляцией разность уровней между высшей и низшей точками по трассе должна быть не более указанной в табл. 18.47. Разность уровней для кабелей с пластмассовой, резиновой и бумажной изоляцией, пропитанной нестекающим составом, не ограничивается. Допустимые усилия тяжения при прокладке кабелей приведены в табл. 18.48 и 18.49.

При прокладке одножильных кабелей в сетях переменного тока должны применяться небронированные кабели, при этом должно соблюдаться указанное в проекте их взаимное расположение.

Таблица 18.49. Допустимые усилия тяжения для кабелей на напряжение до 10 кВ

Сечение жил кабеля, мм ²	Допустимые усилия тяжения, кН					
	Тяжение за алюми- ниевую оболочку			Тяжение за жилы		
	1 кВ	6 кВ	10 кВ	медные	многопро- лочные алю- миниевые	однопроволоч- ные алюми- ниевые
3×240	7,4	9,3	9,8	35	27,4	13,7
3×185	6,4	7,4	8,3	26	21,6	10,8
3×150	5,9	6,4	7,4	22	17,6	8,8
3×120	3,9	4,9	6,4	17,6	13,7	6,9
3×95	3,4	4,4	5,7	13,7	10,8	5,4
3×70	2,9	3,9	4,9	10,0	8,2	3,9
3×50	2,3	3,4	4,4	7,0	5,9	3,9
3×85	1,8	2,9	3,9	4,9	3,4	3,4
3×25	1,7	2,8	3,7	3,4	2,9	2,9

Примечание. Однопроволочные жилы сечением более 70 мм² выполнены из мягкого алюминия, относительное удлинение жил — не менее 30 %.

Таблица 18.50а. Марки кабелей, рекомендуемых для прокладки в земле (траншеях)

Область применения	Кабель прокладывается на трассе	Тип и марки кабелей		
		с бумажной пропитанной изоляцией		с пластмассовой и ре- зиновой изоляцией и оболочкой
		В процессе эксплуата- ции не подвергается растягивающим усилиям	В процессе эксплуата- ции подвергается значительным растягивающим усилиям	В процессе эксплуата- ции не подвергается растягивающим усилиям
В земле (траншеях) с низкой коррозион- ной активностью	Без блуждаю- щих токов С наличием блуждающих то- ков	ААШв, ААШп, ААБл, АСБ, ААл ААШв, ААШп, ААБл, АСБ	ААПл, АСПл ААП2л, АСПл	АВВГ ¹ , АПсВГ ¹ ,

Продолжение табл. 18.50а

Область применения	Кабель прокладывается на трассе	Тип и марки кабелей		
		с бумажной пропитанной изоляцией		с пластмассовой и резиновой изоляцией и оболочкой
		В процессе эксплуатации не подвергается растягивающим усилиям	В процессе эксплуатации подвергается значительным растягивающим усилиям	В процессе эксплуатации не подвергается растягивающим усилиям
В земле (траншеях) со средней коррозионной активностью	Без блуждающих токов С наличием блуждающих токов	ААШв, ААШп, АБл, ААБ2л, АСБ, АСБл, ААл, ААШп, ААШв, ААБ2л, ААБв, АСБл, АСБ2л	ААПл, АСП ААП2л, АСПл	АПвВГ ¹ , АПВГ ¹ , АВВБ, АПВБ, АПСББ, АППБ, АПвВБ, АПБ6Шв, АПвБ6Шв, АВБ6Шп, АПСБ6Шв, АПАШв, АПАШп, АВАШв, АПСАШв, АВРБ, АНРБ, АВАБл, АПАБл
В земле (траншеях) с высокой коррозионной активностью	Без блуждающих токов С наличием блуждающих токов	ААШп, ААШв, ААБ2л, АСП2л, ААП2лШв, ААБ2лШв, ААБ2лШп, ААБв, АСБл, АСБ2л ААШп, ААБв, АСБ2л, АСБ2лШв	 ААП2лШв, АСП2л	

¹ Кабели на номинальное напряжение до 1,0 кВ включительно. Кабели с пластмассовой изоляцией в алюминиевой оболочке не следует применять на трассах с наличием блуждающих токов в грунтах с высокой коррозионной активностью.

Таблица 18.50б. Марки кабелей, рекомендуемых для прокладки в воздухе

Область применения	С бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке		С пластмассовой и резиновой изоляцией и оболочкой	
	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации
Прокладка в помещениях, туннелях, в каналах, кабельных полуэтажах, шахтах, коллекторах, производственных помещениях и др. а) сухих	ААГ, ААШв	ААБлГ	АВВГ, АВРГ, АНРГ, АПвВГ ¹ , АПВГ ¹ , АПсВГ, АПСВГ	АВРБГ, АВБ6Шв, АПАШв, АВАШв, АПвБ6Шв ¹ , АПсБ6Шв, АПСВБГ, АНРБГ
б) сырых, частично затопляемых при наличии среды со слабой коррозионной активностью	ААШв	ААБлГ		
в) сырых, частично затопляемых при наличии среды со средней коррозионной активностью	ААШв, АСШв	ААБвГ, ААБ2лШв, ААБлГ, АСБлГ, АСБ2лГ, АСБ2лШв ⁴		
Прокладка в пожароопасных помещениях	ААГ, ААШв	ААБвГ, ААБлГ, АСБлГ	АВВГ, АВРГ, АПСВГ, АНРГ, АСРГ, АПсВГ	АВБ6Шв, АПСБ6Шв, АПсВГ, АВРБГ, АСРБГ
Прокладка во взрывоопасных зонах классов: а) В-I, В-Ia	СБГ, СБШв	—	ВВГ ² , ВРГ ² , НРГ ² , СРГ ²	ВВБ, ВБ6Шв, НРБГ, СРБГ
б) В-Iг, В-II	ААШв, ААБлГ, АСБГ	—	АВВГ, АВРГ, АНРГ	АВББ, АВБ6Шв

Продолжение табл. 18.50б

Область применения	С бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке		С пластмассовой и резиновой изоляцией в оболочке	
	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации
в) В-1б, В-1а	ААГ, АСГ, АСШв, ААШв	ААБлГ, АСБГ	АВВГ, АВРГ, АНРГ, АСРГ	АНРГ, АСРБГ, АВРБГ
Прокладка на эстакадах:				
а) технологических	ААШв	ААБлГ, ААБлГ ³ , ААБ2лШв, АСБлГ	—	АВРБГ, АНРБГ, АПсВБГ, АПсВШв, АВАШв
б) специальных кабельных	ААШв, ААБлГ, ААБлГ, АСБлГ	—	АВВГ, АВРГ, АНРГ, АПсВГ, АПсВБГ, АПВГ, АПсВсВГ, АПАШв	АВРБГ, АНРБГ, АВАШв, АПсВБГ
в) по мостам	ААШв ^б	ААБлГ		
Прокладка в блоках	СГ, АСГ		АВВГ, АПсВГ, АПВГ, АПВГ	

¹ Для одиночных кабельных линий, прокладываемых в помещениях.² Для групповых осветительных сетей во взрывоопасных зонах класса В-1а.³ Применяются при наличии химически активной среды.⁴ Кабель марки АСБ2лШв может быть использован в исключительно редких случаях с особым обоснованием.^б Прокладка в коробах или при обеспечении защиты от механических повреждений в эксплуатации.

Таблица 18.50в. Марки кабелей, рекомендуемые для прокладки в воде и шахтах

Условия прокладки	С бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке		
	При отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	В процессе эксплуатации не подвергаются значительным растягивающим усилиям	В процессе эксплуатации подвергаются значительным растягивающим усилиям
В воде В шахтах	СШв, ААШв ¹	СБн, СБл, СБШв, ААШв ¹	СКл, АСКл, ОСК, АОСК СПлн, СПШв, СПл

¹ Кабель марки ААШв следует применять в подземных рудных и нерудных выработках, не опасных по газу и пыли.

В табл. 18.50а—18.50в приведены рекомендации по применению кабелей в соответствии с «Едиными техническими указаниями по выбору и применению электрических кабелей» (от 11 мая 1978 г. ГКНТ).

18.11. ДОПУСТИМЫЕ ТОКИ НАГРУЗКИ

В соответствии с ПУЭ при длительном времени работы при максимальном токе нагрузка кабелей выбирается исходя из экономической плотности тока. Кроме того, ток нагрузки выбирается исходя из максимально допустимой температуры в кабеле. Температура жил кабелей не должна превышать значений,

представленных в табл. 18.51. Увеличение температуры выше этих норм приводит к ускоренному старению изоляции, что сопровождается ухудшением электрических свойств.

Расчет допустимого тока нагрузки производится на основе теплового закона Ома:

$$\Phi = pS,$$

где Φ — разность температур, °С; p — тепловой поток на 1 м длины кабеля, Вт/м; S — термическое сопротивление 1 м, °С·м/Вт.

Разность температур жилы и окружающей среды $\Phi_{ж}$ в одножильном кабеле

$$\Phi_{ж} = (p_{ж} + p_{из}/2) S_{из} + (p_{ж} + p_{из} + p_{об})(S_{п} + S_{о}),$$

Т а б л и ц а 18.51. Допустимые температуры нагрева изоляции силовых кабелей при различных режимах работы

Тип кабеля	Напряжение, кВ	Допустимая температура, °С		
		длительно	кратковременно при аварийном состоянии сети	при прохождении тока короткого замыкания при расчете нагрева пс выдержке основной защиты
С бумажной изоляцией	1 6 10	80 65 60	Допускаются токовые нагрузки в течение 5 сут в соответствии с табл. 18.68	200 (150 для кабелей с нестекающей массой)
	20 35	55 50	Не допускаются	175
С обедненно-пропитанной изоляцией	1 6	80 75	95 (10 %-ная перегрузка в течение 2 ч)	200 (150 для кабелей с алюминиевыми жилами)
С резиновой изоляцией	—	65	110 при пусковых режимах	150
С изоляцией из полиэтилена и поливинилхлорида	1—35	70	—	120
Маслонаполненные и в стальных трубах при прокладке в воздухе	110	80	80 при продолжительности непрерывной работы 100 ч. В течение года общая продолжительность — не более 500 ч. Интервал между перегрузками — не менее 10 сут	125 (по выдержке резервной защиты)
В остальных случаях	110 525	70		

П р и м е ч а н и я: 1. В кабелях с бумажной изоляцией, у которых в обозначении марки содержится буква У (см. примечания к табл. 18.28), допускаются температуры 80, 70, 65 °С при напряжениях соответственно 6, 10, 20 и 35 кВ.

2. В маслонаполненных кабелях на напряжение 110 кВ при коэффициенте загрузки, значительно меньшем 1, и при известном тепловом сопротивлении грунта допускается температура 85 °С.

3. Пересчет допустимого тока нагрузки для новой температуры производится по формуле, приведенной в тексте.

где $p_{ж}$, $p_{из}$ и $p_{об}$ — потери в жиле, изоляции и оболочке на 1 м; $S_{из}$, $S_{п}$ и $S_{о}$ — термическое сопротивление изоляции, защитных покровов и окружающей среды.

Для трехжильного кабеля эта разность равна

$$\vartheta_{ж} = 3p_{ж}(S_{из} + S_{п} + S_{о}).$$

В этих кабелях потери в изоляции и оболочке, как правило, значительно меньше потерь в жиле и ими можно пренебречь.

Для кабелей марки ОСБ

$$\vartheta_{ж} = p_{ж}S_{из} + (p_{ж} + p_{об})S_{зап} + 3(p_{ж} + p_{об})(S_{п} + S_{о}),$$

где $S_{зап}$ — термическое сопротивление заполнения между свинцовыми оболочками.

При прокладке нескольких кабелей они нагревают друг друга и тепловой расчет определяется взаимным расположением кабелей. Подробно о тепловом расчете см. в [18.6].

Потери в оболочке пропорциональны потерям в жиле и выражаются через коэффициент потерь в оболочке $y_{об}$, причем $p_{об} = y_{об}p_{ж}$. Значение $y_{об}$ для одножильных кабелей может быть более 1. Для кабелей марки ОСБ $y_{об} = 0,1 + 0,2$.

Ток нагрузки может быть рассчитан исходя из приведенных выше уравнений.

Для одножильных кабелей

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_{ж} - p_{из}(S_{из}/2 + S_{п} + S_{о})}{R_{ж}[S_{из} + (1 + y_{об})(S_{п} + S_{о})]}};$$

для трехжильных кабелей

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_{ж}}{3R_{ж}(S_{из} + S_{п} + S_{о})}};$$

для кабелей марок ОСБ и ОСК

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_{ж}}{R_{ж}[S_{из} + (1 + y_{об})S_{зап} + 3(1 + y_{об})(S_{п} + S_{о})]}};$$

где $R_{ж}$ — сопротивление жилы переменному току при максимально допустимой рабочей температуре.

Термическое сопротивление изоляции кабелей вычисляется по формулам:

а) для одножильных кабелей и фазы кабелей марки ОСБ

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{R}{r};$$

Таблица 18.52. Удельные термические сопротивления кабельных материалов

Наименование материала	σ , °С·м/Вт
Пропитанная изоляция (бумажная) кабелей с вязкой пропиткой и с нестекающим составом	5,5—7,0
Обедненно-пропитанная бумажная изоляция	8,5—10,0
Пропитанная бумажная изоляция маслонаполненных кабелей	4,5—5,0
Резина	5,0—7,0
Полиэтилен	3,0—4,0
Поливинилхлорид	6,0—7,0
Кабельная пряжа	5,0—6,0
Защитные покрытия из кабельной пряжи в комплексе с ленточной броней	3,0
Медь	0,0027
Свинец	0,029
Алюминий	0,0048

б) для трехжильных кабелей с поясной изоляцией с круглой жилой

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi \cdot 3} G;$$

$$G = (0,85 + 0,2n) \ln [(8,3 - 2,2n)m + 1];$$

в) для кабелей с числом жил k более 3

$$G = \ln \left[\frac{k(8\Delta + \Delta_1)(\Delta + \Delta_1)}{8r\Delta_1} + 1 \right];$$

г) для кабелей с секторными жилами

$$S_{из} = 1,1 \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{R}{R_{ск}};$$

$$R = R_{ск} + \Delta + \Delta_1;$$

где $\sigma_{из}$ — удельное термическое сопротивление изоляции (табл. 18.52); R — радиус по изоляции; r — радиус жилы; $R_{ск}$ — радиус сектора; G — геометрический коэффициент; Δ и Δ_1 — толщина жилой и поясной изоляции.

Термическое сопротивление заполнения $S_{зап}$ в кабелях с отдельно оцинкованными жилами можно вычислить по формуле для трехжильных кабелей, в которой в качестве радиуса жилы принят наружный радиус свинцовой оболочки, в качестве толщины жилой изоляции Δ — толщина подушки на каждой оболочке и в качестве толщины поясной изоляции Δ_1 — толщина общей подушки под броней.

При наличии металлических экранов вокруг изолированных фаз тепловое сопротивление изоляции уменьшается и $S_{из}$ необходимо умножить на коэффициент k_α , значение которого приведено на рис. 18.11.

Параметр

$$p = \Delta_2 \sigma_{из} / 2r\sigma_\alpha,$$

где Δ_2 и σ_α — толщина и удельное термическое сопротивление экрана; r — радиус жилы.

Термическое сопротивление защитных покрытий вычисляется так же, как термическое сопротивление изоляции:

$$S_{п} = \frac{\sigma_{п}}{2\pi} \ln \frac{R_{п2}}{R_{п1}};$$

где $\sigma_{п}$ — удельное термическое сопротивление защитного покрытия (табл. 18.52); $R_{п1}$ и $R_{п2}$ — внутренний и внешний радиусы защитного покрытия.

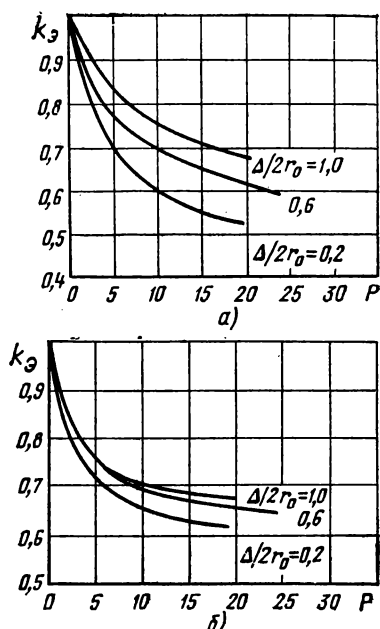


Рис. 18.11. Отношение теплового сопротивления изоляции экранированного кабеля к тепловому сопротивлению неэкранированного кабеля:

а — с круглыми жилами; б — с секторными жилами

Термическое сопротивление окружающей среды при прокладке в грунте вычисляется по формуле

$$S_3 = \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \frac{4L}{D},$$

где σ_3 — удельное тепловое сопротивление грунта (табл. 18.53); L — глубина прокладки; D — диаметр кабеля.

При расчете должно быть учтено влияние соседних кабелей. Для одножильных кабелей этот учет производится с помощью табл. 18.67. Термическое сопротивление при прокладке в воздухе вычисляется по формуле

$$S_в = 1/(\pi D \alpha),$$

где D — наружный диаметр кабеля; α — коэффициент теплоотдачи от поверхности кабеля в окружающую среду.

Коэффициент α равен сумме коэффициентов конвективной теплоотдачи α_k и теплоотдачи излучением $\alpha_{из}$. Расчет этого коэффициента

Таблица 18.53. Удельное термическое сопротивление грунта

Грунт	Влажность, %	σ , °С·м/Вт
Песчаный	до 4	2,0
	4—6	1,33
	7—9	0,8
	9	0,53
Песчано-глинистый	2—3	—
	8—12	1,33
	12—14	0,88
	14	0,53
Каменистый	—	2,0

для проводов различного диаметра и различных кабелей приведен в [18.6]. Для кабелей диаметром более 5 мм, проложенных при обычной температуре воздуха в пространстве, размер которого значительно больше диаметра кабеля, коэффициент α Вт/(м²·°C), может быть вычислен по формуле

$$\alpha = 4,5 \sqrt[4]{\frac{\vartheta_{\text{п}}}{D}} + \epsilon_{\text{п}} \sigma \Theta,$$

где $\Theta \approx T_0^3 (4 + 6\vartheta_{\text{п}}/T_0)$; T_0 — температура окружающей среды, К; $\vartheta_{\text{п}}$ — разность температур поверхности кабеля и окружающей среды; $\epsilon_{\text{п}}$ — коэффициент излучения поверхности кабеля; $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-6}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана—Больцмана; D — наружный диаметр кабеля, см.

Значение $\epsilon_{\text{п}}$ при наличии защитных покрытий составляет примерно 0,8, для стальной брони 0,5—0,6, а для алюминиевой оболочки 0,2—0,3.

Значение $\vartheta_{\text{п}}$ обычно составляет около 20 °C. Для уточненных расчетов можно использовать метод последовательных приближений, причем $\vartheta_{\text{п}}$ может быть вычислена по формуле

$$\vartheta_{\text{п}} = (p_{\text{ж}} + p_{\text{из}} + p_{\text{об}}) S_{\text{в}}.$$

Если монтаж кабелей выполнен на лотках плотной группой, то допустимый ток нагрузки должен быть умножен на снижающий коэффициент $k_{\text{гр}}$:

$$k_{\text{гр}} = \frac{A}{\sqrt{\left(1 + \lg \frac{n}{m}\right) (1 + 2,3 \lg m)}},$$

где n — общее число кабелей в группе; m — число слоев в группе.

Коэффициент $A=1$ для небронированных кабелей, а для бронированных соответственно при однослойной, двухслойной и трехслойной прокладке $A=1,08; 1,15; 1,2$.

Температура окружающей среды при прокладке в группах принимается равной 15 °C, в воздухе 25 °C и в туннелях 35 °C.

Применение искусственного охлаждения позволяет повысить допустимый ток нагрузки. При прокладке рядом с кабелями в грунте труб с охлаждающей водой ток можно увеличить на 10—20 %. При прокачивании хладагента (масло, вода, ожиженные газы) по каналу внутри жилы возможно значительное увеличение тока нагрузки. При изменении температуры окружающей среды или максимально допустимой температуры кабеля допустимый ток нагрузки должен быть умножен на коэффициент

$$k_{\text{ср}} = \sqrt{(T_{\text{м}} - T_{02}) / (T_{\text{м}} - T_{01})},$$

где $T_{\text{м}}$ — максимально допустимая температура жилы; T_{01} — расчетная температура окружающей среды; T_{02} — измененная температура окружающей среды, для которой необходимо пересчитать ток нагрузки.

Допустимые токи нагрузки в соответствии с ПУЭ приведены в табл. 18.54—18.72. В таблицах приводятся допустимые токи нагрузки только для кабелей с медными жилами. Для кабелей с алюминиевыми жилами ток нагрузки должен быть умножен на коэффициент 0,77.

Таблица 18.54. Одножильные кабели с медной жилой с бумажной пропитанной изоляцией в свинцовой оболочке небронированные, прокладываемые в воздухе

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей				
	до 3 кВ	6 кВ	10 кВ	20 кВ	35 кВ
2,5	35	—	—	—	—
4	50	—	—	—	—
6	60	—	—	—	—
10	85	75	—	—	—
16	120	110	90	—	—
25	145	135	125	105	—
35	170	155	145	125	—
50	215	200	190	155	—
70	260	240	225	185	180
95	305	280	265	220	215
120	330	300	285	245	249
150	360	325	310	270	265
185	385	350	335	290	285
240	435	395	380	320	315
300	460	420	405	350	340
400	485	440	425	370	—
500	505	460	445	—	—
625	525	—	—	—	—
800	550	—	—	—	—

Примечание. Токовые нагрузки относятся к работе на переменном токе, при этом свинцовые оболочки соединены между собой и заземлены на обоих концах; число рядом лежащих кабелей 3, расстояние между кабелями в свету — не более 125 мм и не менее 35 мм.

Таблица 18.55. Трехжильные кабели с отдельно оцинкованными (или с отдельно опрессованными алюминием) медными жилами с бумажной изоляцией, прокладываемые в земле, воде, воздухе

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей, прокладываемых					
	в земле			в воздухе		
	в земле	в воде	в воздухе	в земле	в воде	в воздухе
	20 кВ			35 кВ		
25	110	120	85	—	—	—
35	135	145	100	—	—	—
50	165	180	120	—	—	—
70	200	225	150	195	210	145
95	240	275	180	235	255	180
120	275	315	205	270	290	205
150	315	350	230	310	—	230
185	355	390	265	—	—	—

Таблица 18.56. Провода с медными жилами с резиновой изоляцией для электрифицированного транспорта на напряжения 1,3 и 4 кВ

Сечение жилы, мм ²	Токовая нагрузка, А	Сечение жилы, мм ²	Токовая нагрузка, А	Сечение жилы, мм ²	Токовая нагрузка, А
1,0	20	16	115	120	390
1,5	25	25	150	150	445
2,5	40	35	185	185	505
4	50	50	230	240	590
6	65	70	285	300	670
10	90	95	340	350	745

Таблица 18.57. Кабели с медными жилами с бумажной пропитанной маслосанифольной и нестекающей массами изоляцией в свинцовой или алюминиевой оболочке, прокладываемые в земле

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей					
	одножильных до 1 кВ	двухжильных до 1 кВ	трехжильных			четырёхжильных до 1 кВ
			до 3 кВ	6 кВ	10 кВ	
2,5	—	45	40	—	—	—
4	80	60	55	—	—	50
6	105	80	70	—	—	60
10	140	105	95	80	—	85
16	175	140	120	105	95	115
25	235	185	160	135	120	150
35	285	225	190	160	150	175
50	360	270	235	200	180	215
70	440	325	285	245	215	265
95	520	380	340	295	265	310
120	595	435	390	340	310	350
150	675	500	435	390	355	395
185	755	—	490	440	400	450
240	880	—	570	510	460	—
300	1000	—	—	—	—	—
400	1220	—	—	—	—	—
500	1400	—	—	—	—	—
625	1520	—	—	—	—	—
800	1700	—	—	—	—	—

Примечание. Токовые нагрузки на одножильные кабели даны для работы при постоянном токе.

Таблица 18.58. Кабели с медными жилами с бумажной пропитанной маслосанифольной и нестекающей массами изоляцией в свинцовой оболочке, прокладываемые в воздухе

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей					
	одножильных до 1 кВ	двухжильных до 1 кВ	трехжильных			четырёхжильных до 1 кВ
			до 3 кВ	до 6 кВ	10 кВ	
2,5	40	30	28	—	—	—
4	55	40	37	—	—	35
6	75	55	45	—	—	45
10	95	75	60	55	—	60
16	120	95	80	65	60	80
25	160	130	105	90	85	100
35	200	150	125	110	105	120
50	245	185	155	145	135	145
70	305	225	200	175	165	185
95	360	275	245	215	200	215
120	425	320	285	250	240	260
150	470	375	330	290	270	300
185	525	—	375	325	305	340
240	610	—	430	375	350	—
300	720	—	—	—	—	—
400	880	—	—	—	—	—
500	1020	—	—	—	—	—
625	1180	—	—	—	—	—
800	1400	—	—	—	—	—

Примечание. Токовые нагрузки на одножильные кабели даны для работы при постоянном токе.

Таблица 18.59. Кабели с медными жилами с бумажной пропитанной маслосанифольной и нестекающей массами изоляцией в свинцовой оболочке, прокладываемые в воде

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей			
	трехжильных			четырёхжильных до 1 кВ
	до 3 кВ	6 кВ	10 кВ	
16	—	135	120	—
25	210	170	150	195
35	250	205	180	280
50	305	255	220	285
70	375	310	275	350
95	440	375	340	410
120	505	430	395	470
150	565	500	450	—
185	615	545	510	—
240	715	625	585	—

Таблица 18.60. Трехжильные кабели с медными жилами на напряжение 6 кВ с объединенно-пропитанной изоляцией в общей свинцовой оболочке, прокладываемые в земле, воде и воздухе

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей, проложенных		
	в земле	в воде	в воздухе
16	90	100	65
25	120	140	90
35	145	175	110
50	180	220	140
70	220	275	170
95	265	335	210
120	310	385	245
150	355	450	290

Таблица 18.61. Трехжильные кабели с отдельно освинцованными медными жилами, с объединенно-пропитанной изоляцией, прокладываемые в земле, воде и воздухе

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей, проложенных					
	6 кВ			10 кВ		
	в земле	в воде	в воздухе	в земле	в воде	в воздухе
16	90	115	80	—	—	—
25	125	150	105	110	140	100
35	155	195	125	130	170	120
50	185	230	150	160	210	145
70	225	280	190	200	255	180
95	270	340	230	250	305	220
120	310	385	265	290	360	255
150	355	450	310	335	405	295

Таблица 18.62. Кабели и провода с медными жилами с резиновой изоляцией в металлических защитных оболочках и кабели с медными жилами с резиновой или пластмассовой изоляцией в свинцовой, пластмассовой или резиновой оболочке, бронированные и небронированные (1 кВ)

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей и проводов					
	одножильных		двухжильных		трехжильных	
	в воздухе		в воздухе	в земле	в воздухе	в земле
1,5	23		19	33	19	27
2,5	30		27	44	25	38
4	41		38	55	35	49
6	50		50	70	42	60
10	80		70	105	55	90
16	100		90	135	75	115
25	140		115	175	95	150
35	170		140	210	120	180
50	215		175	265	145	225
70	270		215	320	180	275
95	325		260	385	220	330
120	385		300	445	260	385
150	440		350	505	305	435
185	510		405	570	350	500
240	605		—	—	—	—

Примечание. Токовые нагрузки относятся к проводам и кабелям как с заземляющей жилой, так и без нее.

Таблица 18.63. Кабели переносные шланговые с медными жилами с резиновой изоляцией для торфопредприятий

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей		
	0,5 кВ	3 кВ	6 кВ
6	44	45	47
10	60	60	65
16	80	80	85
25	100	105	105
35	125	125	130
50	155	155	160
70	190	190	—

Примечание. Токовые нагрузки относятся к кабелям как с заземляющей жилой, так и без нее.

Таблица 18.64. Кабели шланговые с медными жилами с резиновой изоляцией для передвижных электроприемников

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей	
	3 кВ	6 кВ
16	85	90
25	115	120
35	140	145
50	175	180
70	215	220
95	260	265
120	305	310
150	345	350

Примечание. Токовые нагрузки относятся к кабелям как с заземляющей жилой, так и без нее.

Таблица 18.65. Провода и шнуры с резиновой и пластмассовой изоляцией с медными жилами

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А						
	Провода проложены в одной трубе						Провода проложены открыто
	Два одножильных	Три одножильных	Четыре одножильных	Один двухжильный	Один трехжильный		
0,5	11	—	—	—	—	—	—
0,75	15	—	—	—	—	—	—
1	17	16	15	14	15	14	—
1,5	23	19	17	16	18	15	—
2,5	30	27	25	25	25	21	—
4	41	38	35	30	32	27	—
6	50	46	42	40	40	34	—
10	80	70	60	50	55	50	—
16	100	85	80	75	80	70	—
25	140	115	100	90	100	85	—
35	170	135	125	115	125	100	—
50	215	185	170	150	160	135	—
70	270	225	210	185	195	175	—
95	330	275	255	225	245	215	—
120	385	315	290	260	295	250	—
150	440	360	330	—	—	—	—
185	510	—	—	—	—	—	—
240	605	—	—	—	—	—	—
300	695	—	—	—	—	—	—
400	830	—	—	—	—	—	—

Таблица 18.66. Шнуры переносные шланговые легкие и средние, кабели переносные шланговые тяжелые, кабели шахтные гибкие шланговые, прожекторные и провода переносные с медными жилами

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей		
	одножильных	двухжильных	трехжильных
0,5	—	12	—
0,75	—	16	14
1,0	—	18	16
1,5	—	23	20
2,5	40	33	28
4	50	43	36
6	65	55	45
10	90	75	60
16	120	95	80
25	160	125	105
35	235	185	160
50	235	185	160
70	290	235	200

Примечание. Токовые нагрузки относятся к шнурам, проводам и кабелям как с заземляющей жилой, так и без нее.

Таблица 18.67. Поправочные коэффициенты на число работающих одножильных кабелей, лежащих рядом в земле, в трубах и без них

Расстояние в свету, мм	Число кабелей					
	1	2	3	4	5	6
100	1,00	0,90	0,85	0,80	0,78	0,75
200	1,00	0,92	0,87	0,84	0,82	0,81
300	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	0,85

Таблица 18.68. Допустимая кратковременная перегрузка кабелей на напряжение до 10 кВ (по расчетным данным)

Предварительная нагрузка кабелей	Длительность перегрузки, мин	Сечение жилы, мм ²		
		50—95	120—240	300—800
0	30 60	1,15 —	1,25 1,10	1,45 1,20
0,5 номинальной	30 60	1,10 1,05	1,20 1,05	1,40 1,15
0,7 номинальной	30 60	1,05 —	1,15 1,05	1,30 1,10

Таблица 18.69. Допустимые токи нагрузки для кабелей марки ВВВ при одиночной прокладке в воздухе, А

Сечение жилы, мм ²	Число жил		Сечение жилы, мм ²	Число жил	
	2	3 и 4		2	3 и 4
1,5	20	20	25	127	105
2,5	29	27	35	154	132
4	37	34	50	195	161
6	51	43	70	—	201
10	76	60	95	—	238
16	93	78	120	—	—

Таблица 18.70. Длительно допустимые расчетные нагрузки на трехжильные кабели с медными жилами и пластмассовой изоляцией на напряжения 6—35 кВ

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей			
	в воздухе		в земле	
	6 кВ		10 кВ	
10	55	80	—	—
16	65	105	60	95
25	90	135	85	120
35	110	160	105	150
50	145	200	135	180
70	175	245	165	215

Таблица 18.72. Длительно допустимые расчетные нагрузки на кабельные линии в стальном трубопроводе с маслом под давлением (кабели с медными жилами) при прокладке в земле с расчетной температурой 15 °С и в воздухе с расчетной температурой 25 °С

а) Одноцепные и двухцепные линии 110 и 220 кВ

Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм ²	Внешний диаметр трубопровода с антикоррозионным покрытием, мм	Допустимые нагрузки, А			Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм ²	Внешний диаметр трубопровода с антикоррозионным покрытием, мм	Допустимые нагрузки, А		
			Прокладка в воздухе	Прокладка в земле					Прокладка в воздухе	Прокладка в земле	
				Одноцепные линии	Двухцепные линии					Одноцепные линии	Двухцепные линии
110	150	144	420	330	300	220	270	211	520	425	380
	270	159	590	450	595		400	239	630	495	450
	400	186	735	540	475		550	239	730	555	500
	550	186	860	615	540		800	239	830	615	540
	800	211	980	670	585						

Продолжение табл. 18.70

Сечение жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А, кабелей			
	в воздухе		в земле	
	6 кВ		10 кВ	
95	215	295	200	265
120	250	340	240	310
150	290	390	270	355
20 кВ		35 кВ		
50	120	165	—	—
70	150	200	145	195
95	180	240	180	235
120	205	275	205	270
150	230	315	—	—

Таблица 18.71. Длительно допустимые расчетные нагрузки на маслонаполненные кабельные линии среднего давления из трех одножильных маслонаполненных кабелей МНСА с медной жилой при прокладке в воздухе с расчетной температурой 25 °С и в земле с расчетной температурой 15 °С. Свинцовые оболочки соединены и заземлены с двух сторон. Кабели проложены по треугольнику

Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм ²	Допустимые нагрузки, А		
		Прокладка в воздухе	Прокладка в земле	
			Одноцепные линии	Двухцепные линии
110	150	450	380	330
	270	620	510	445
	350	710	570	500
	500	860	660	575
	700	1010	750	640
220	270	540	440	390
	350	615	500	430
	500	785	590	500
	700	860	650	545

Примечание. Для кабелей со стальной проволоочной броней марки МНСК при механизированной прокладке допустимый ток меньше на 6 %. Бронепроводы фаз, как и свинцовые оболочки, соединяются и заземляются с двух сторон.

Продолжение табл. 18.72

б) Одноцепные линии на 380 и 525 кВ*

Напряжение, кВ	Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Прокладка в земле			Прокладка в воздухе			
		Естественное охлаждение	Искусственное охлаждение при длине секции, м		без вентиляции	с вентиляцией (скорость воздуха 1,5—2 м/с)	без вентиляции, но с искусственным охлаждением при длине секции, м	
			300	1000			300	1000
380	550	490	860	750	690	750	870	785
	700	520	975	835	750	830	970	880
	1000	550	1140	980	880	980	1140	1035
	1500	575	1325	1130	990	1100	1340	1200
525	500	435	820	710	650	710	830	742
	700	460	940	820	730	800	950	856
	1000	490	1105	960	800	930	1120	1005
	1500	490	1280	1105	950	1060	1300	1165

* Продольная циркуляция масла в трубопроводе и охлаждение масла в теплообменниках. Температура входящего масла 25 °С, скорость масла в трубопроводе 10 см/с, расход масла 10 м³/ч.

Токи нагрузки для кабелей, проложенных в грунте, рассчитаны исходя из удельного термического сопротивления грунта 1,2 °С·м/Вт.

Если допустимая температура жилы изменилась с $T_{м1}$ до $T_{м2}$, то допустимый ток нагрузки необходимо умножить на коэффициент k_M , вычисляемый по формуле

$$k_M = \sqrt{\frac{(T_{м2} - T_0)[1 + \alpha(T_{м1} - 20)]}{(T_{м1} - T_0)[1 + \alpha(T_{м2} - 20)]}}$$

где $\alpha \approx 0,004$ °С⁻¹ для меди и алюминия.

Допустимые токи нагрузки I_1 для кабеля на напряжение 10 кВ с сечением жил 3×95 мм², проложенного в блоках, приведены в табл. 18.73, с. 36. Для других сечений жил ток нагрузки вычисляется по формуле

$$I = abcI_1,$$

где a — коэффициент, приведенный в табл. 18.74; b — коэффициент для кабелей на напряжения 3, 6 и 10 кВ, равный соответственно 1,09; 1,05 и 1,007; c — поправочный коэффициент на среднесуточную нагрузку блока, определяемый в зависимости от отношения среднесуточной передаваемой мощности к номинальной и равный 1,07 для отношения 0,7.

При прокладке параллельно двух блоков нагрузки на кабели должны быть уменьшены в соответствии с табл. 18.75.

Таблица 18.74. Поправочные коэффициенты a на сечение кабеля

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Номер канала блока (отверстия)			
	1	2	3	4
25	0,44	0,46	0,47	0,51
35	0,54	0,57	0,57	0,60
50	0,67	0,69	0,69	0,71
70	0,81	0,84	0,84	0,85
95	1,00	1,00	1,00	1,00
120	1,14	1,13	1,13	1,12
150	1,33	1,30	1,29	1,26
185	1,50	1,46	1,46	1,38
240	1,78	1,70	1,68	1,55

Таблица 18.75. Коэффициенты уменьшения допустимой токовой нагрузки на кабели, прокладываемые в параллельных блоках одинаковой конфигурации

Расстояние между блоками, мм	500	1000	1500	2000	2500	3000
Значение коэффициента	0,85	0,89	0,91	0,93	0,95	0,96

18.12. АРМАТУРА СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Кабельная арматура предназначена для соединения строительных длин кабеля, а также для оконцевания кабельных линий. В зависимости от назначения кабельную арматуру можно разделить на следующие основные группы:

1) соединительные муфты и их разновидности (ответвительные, соединительно-разветвительные) — арматура для соединения между собой отдельных строительных длин кабелей;

2) стопорные и полустопорные муфты — арматура для соединения строительных длин и одновременного секционирования кабельных линий с целью предотвращения перетекания масла или пропиточного состава из секции в секцию;

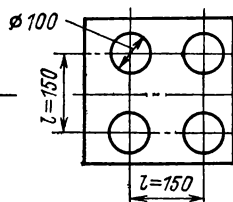
3) концевые муфты и концевые заделки — арматура для оконцевания кабелей на открытом воздухе и внутри помещений.

Кроме кабельной арматуры в данном параграфе будет рассмотрена аппаратура для поддержания в заданных пределах давления масла в маслонаполненных кабельных линиях.

Общие технические требования на кабельную арматуру напряжением 1—35 кВ представлены в ГОСТ 13781.0-79 (для силовых кабелей с бумажной пропитанной изоляцией) и в ГОСТ 23953.0-80 (для силовых кабелей с пластмассовой изоляцией), а на кабельную арматуру напряжением 110 и 220 кВ — в ГОСТ 160538.003-71. Типы муфт имеют соответствующие обозначения (табл. 18.76 и 18.77).

Таблица 18.73. Допустимые токи нагрузки кабеля, проложенного в блоках

Группы	Конфигурация блоков	№ отвер- стий	I _а , А
I		1	191
II		2	173
		3	167
III		2	154
IV		2	147
		3	138
V		2	143
		3	135
		4	131
VI		2	140
		3	132
		4	118
VII		2	136
		3	132
		4	119
VIII		2	135
		3	124
		4	104
IX		2	135
		3	118
		4	100
X		2	133
		3	116
		4	81
XI		2	129
		3	114
		4	79



Т а б л и ц а 18.76. Обозначения типов муфт напряжением 1—35 кВ

Обозначение типа	Наименование муфты	Область применения	Номера ГОСТ или технической документации на арматуру
С	Муфта соединительная	Соединение кабелей	ГОСТ 13781.1-79 ГОСТ 13781.2-77 ГОСТ 13781.3-79 ТУ 16.538.380-81 ТУ 16.538.397-83 ТУ 16.538.346-79
О	Муфта ответвительная	Для присоединения распределительных кабельных линий к магистральной кабельной линии	Документация пересматривается
СП	Муфта соединительная переходная	Для соединения кабелей с пластмассовой изоляцией с кабелями с бумажной изоляцией	ТУ 16.538.364-80 ТУ 16.538.365-80
КН	Муфта концевая наружной установки	Для оконцевания кабелей на открытом воздухе	ГОСТ 13781.4-76 ТУ 16.538.280-79 ТУ 16.538.345-79 ТУ 16.538.394-83 ТУ 16.538.337-79
КМ	Муфта концевая мачтовая	Для оконцевания кабелей на открытом воздухе при переходе на воздушную линию электропередачи	
КВ	Муфта концевая внутренней установки	Для оконцевания кабелей внутри помещений	ТУ 16.538.251-81 ТУ 16.538.141-77 ТУ 16.538.284-83

Т а б л и ц а 18.77. Марки и область применения муфт на 110 и 220 кВ для кабелей низкого давления марок МНС, МНСШв и МНСК и кабелей высокого давления марки МВДТ

Марка	Наименование муфты	Область применения
МКМН	Муфта концевая для маслонаполненного кабеля низкого давления	Для присоединения кабельных линий к электрическим аппаратам или воздушным линиям
МСМН	Муфта соединительная для маслонаполненного кабеля низкого давления	Для соединения отдельных строительных длин кабеля
КМВДТ	Муфта концевая для маслонаполненного кабеля высокого давления	Для присоединения кабельных линий к электрическим аппаратам или воздушным линиям
СМВДТ	Муфта соединительная для маслонаполненного кабеля высокого давления	Для соединения отдельных строительных длин кабеля
СРМВДТ	Муфта соединительно-разветвительная для маслонаполненного кабеля высокого давления	Для соединения отдельных строительных длин кабеля с кабелем разводки фаз от магистрального трубопровода к конечным муфтам
РМВДТ	Муфта разветвительная для маслонаполненного кабеля	Для разводки фаз маслонаполненного кабеля высокого давления от стального трубопровода к конечным муфтам
ПМВДТ	Муфта полустопорная для маслонаполненного кабеля высокого давления	Для соединения отдельных строительных длин кабеля и разделения масляного питания при ремонтных работах
КТНДУ	Ввод кабельный унифицированный в трансформатор	Для присоединения кабельной линии к трансформатору

Примечание. Муфта марки КТНДУ изготавливается по ТУ 16.538.210-73, остальные — по ОСТ 160.538.003.0-71.

Муфты типов С и СП могут иметь защитные кожухи трех типов:

К — защитный кожух для муфт, проложенных в помещении или в специальных сооружениях;

К_з — защитный кожух для муфт, проложенных в земле;

К_в — защитный кожух для муфт, проложенных под водой.

Материал корпуса муфты и кожуха также имеет буквенное обозначение, например: Ч — чугун, С — свинец, Л — латунь, Ст — сталь, П — пластмасса, Э — эпоксидный компаунд и др. Условное обозначение марки муфты состоит из обозначения типа муфты, типа и материала кожуха, буквы, обозначающей конструктивные особенности исполнения (например, О — однофазная муфта, Э — со сплошным экраном, М — малогабаритная и т. д.). Далее указываются количество фаз и сечение жил кабеля, напряжение и номер соответствующего ГОСТ

или технического условия на муфту. Пример условного обозначения соединительной лагунной однофазной муфты со сплошным экраном с защитным подземным кожухом для кабеля с сечением жил 3×120 мм² на напряжение 35 кВ: муфта СЛОЭ-К_зЧ-3×120-35 ГОСТ 13781.3-79. Муфты для силовых кабелей с пластмассовой изоляцией в условном обозначении имеют еще индексы, обозначающие изоляцию кабеля (П — полиэтилен и поливинилхлорид, Пв — вулканизированный полиэтилен) и материала изоляции муфты (Э — эпоксидная, сл — на основе самосклеивающихся лент, эл — эластомерная и т. д.).

Пример условного обозначения соединительной муфты на основе самосклеивающихся лент с защитным подземным пластмассовым кожухом для кабеля с изоляцией из полиэтилена и поливинилхлорида сечением жил 3×120 мм² на напряжение 6 кВ: муфта ПСсл-К_зП-3×120-6 ТУ 16-538-346-79.

В условное обозначение муфт для маслонаполненных кабелей должны входить: 1) марка муфты; 2) цифра, указывающая напряжение; 3) цифра, указывающая номер конструкции; 4) количество фаз и сечение жилы кабеля; 5) обозначение стандарта. Пример условного обозначения: МКМН-110-1; $1 \times 500 \text{ мм}^2$ ОСТ 160.538.003-0-71 — муфта концевая для маслонаполненного кабеля низкого давления на напряжение 110 кВ конструкции 1 для кабеля сечением $1 \times 500 \text{ мм}^2$ по ОСТ 160.538.003-0-71.

Для соединения отдельных строительных длин силовых кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на 1—35 кВ могут применяться как муфты в металлическом корпусе с заливкой либо битуминозной массой, либо маслосканифольной заливочной массой, так и эпоксидные муфты. Последние менее пожароопасны по сравнению с металлическими.

Конструкция металлических муфт зависит от напряжения. Для соединения кабелей на напряжение 1 кВ применяются соединительные чугунные муфты (рис. 18.12) типа СЧ или СЧм, для кабелей на напряжение 6 и 10 кВ — свинцовые муфты типа СС (рис. 18.13) или алю-

миниевые типа СА. Свинцовые и алюминиевые муфты при прокладке в землю защищаются от механических повреждений защитными кожухами из чугуна типа К₃Ч, К₃Чг (герметичное исполнение) или из стеклопластика К₃П. Защита алюминиевого корпуса муфты от коррозии осуществляется дополнительными наружными подмотками и термоусаживающимися трубками.

Для соединения кабелей на напряжения 20 и 35 кВ применяются латунные и свинцовые однофазные муфты типа СЛО или ССО (рис. 18.14). При прокладке в земле для защиты от механических повреждений и коррозии три однофазные муфты помещаются в общий металлический кожух (чугунный или стальной) или кожух из стеклопластика.

Основные габаритные размеры металлических соединительных муфт приведены в табл. 18.78.

Эпоксидные соединительные муфты типа СЭ применяются для соединения кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на напряжения 1—10 кВ как на горизонтальных участках трассы, так и при прокладке кабелей на наклонных трассах с разностью уровней между

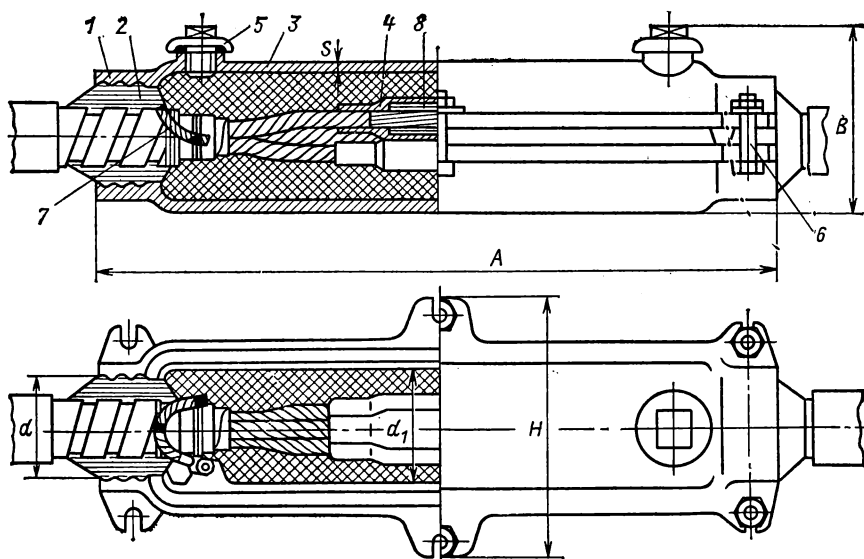


Рис. 18.12. Малогабаритная соединительная чугунная муфта типа СЧм на 1 кВ:

1 — верхняя полумуфта; 2 — подмотка из смоляной ленты; 3 — нижняя полумуфта; 4 — изолирующая подмотка из ленты ЛЭТСАР; 5 — пробка заливочного отверстия; 6 — стягивающий болт; 7 — провод заземления; 8 — гильза соединительная

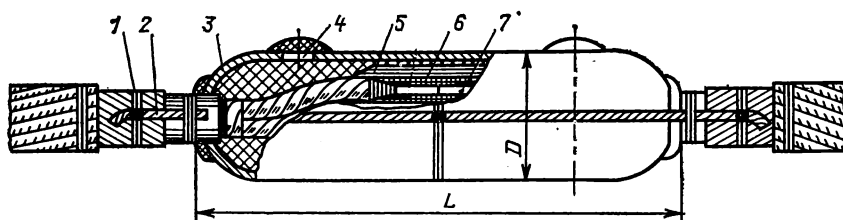


Рис. 18.13. Свинцовая соединительная муфта типа СС для кабелей на 6—10 кВ:

1 — бандаж; 2 — провод заземления; 3 — корпус муфты; 4 — заливочное отверстие; 5 — подмотка рулонами; 6 — подмотка роликами; 7 — соединительная гильза

Таблица 18.78. Типы и основные размеры металлических муфт* для кабелей 1—35 кВ (см. рис. 18.12, 18.13 и 18.14)

Тип муфты	Кабели на напряжение, кВ					Размеры, мм	
	1	6	10	20	35	муфты А × В × Н или L × D	защитного кожуха L × D
	Сечение жилы, мм ²						
СЧм-40 СЧм-50 СЧм-60 СЧм-70	До 35 50, 70, 95 120, 150 185, 240	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	475×86×142 560×95×151 630×108×164 700×116×172	—
СС-60 СС-70 СС-80 СС-90 СС-100 СС-110	— — — — — —	10, 16 25, 35, 50 90, 95 120, 150 185, 240 —	— До 25 35, 50 70, 95 120, 150 185, 240	— — — — — —	— — — — — —	450×60 475×70 525×80 550×90 600×100 890×110	} 750×108 } 840×130 } 1000×149
СЛО-20; ССО-20 СЛО-35; ССО-35	— — — —	— — — —	— — — —	25—185 — — —	— 120—300 — —	640×65 740×80 — —	1775×246 2000×276 — —

* Размеры алюминиевых муфт для кабелей 6—10 кВ незначительно отличаются от размеров свинцовых муфт; размеры защитных кожухов такие же, как у соответствующих им по диаметру свинцовых муфт.

высшей и низшей точками, превышающей допустимое значение (см. табл. 18.48). В этом случае они играют роль стопорных муфт. Корпуса соединительных муфт на 6—10 кВ типа СЭ или СЭв (рис. 18.15) (с поперечным или продольным разъемом) отливаются на заводе. Корпуса муфт на 1 кВ типа СЭс отливаются непосредственно при монтаже в съемные металлические или пластмассовые формы (рис. 18.16, а). Соединительные муфты типа СЭ или СЭв имеют ряд преимуществ по сравнению с муфтами типа СЭс, а именно: корпус муфты, отлитый в заводских условиях, имеет более высокие электрические свойства, кроме того, уменьшается количество эпоксидного компаунда, заливаемого в муфту при монтаже. В связи с этим муфты типа СЭс применяются только для кабелей напряжением 1 кВ, а муфты типа СЭ или СЭв — для кабелей на 6 и 10 кВ. Для кабелей с однопроволочными жилами до 1 кВ находят применение малогабаритные муфты с корпусами из эпоксидного компаунда (рис. 18.16, б) типа СЭм. Соединение жил в этой муфте производится холодной сваркой. Размеры эпоксидных соединительных муфт приведены в табл. 18.79.

Для соединения кабелей марки ОСБ на 20 и 35 кВ, а также в качестве стопорных муфт

Таблица 18.79. Размеры эпоксидных соединительных муфт для трехжильных кабелей (рис. 18.15 и 18.16, а, б)

Типораз- меры муфты	Сечение жил, мм ² , кабе- ля для напряжения, кВ			Основные раз- меры, мм	
	1	6	10	L	D
СЭс-1	10—50	—	—	400	50
СЭс-2	70—120	—	—	470	75
СЭс-3	150—240	—	—	560	80
СЭ-1	—	10—70	16—50	670	76
СЭ-2	—	95—120	70—90	720	86
СЭ-3	—	150—185	120—750	760	101
СЭ-4	—	240	185—240	830	103
СЭв-1	До 120	10—70	16—50	570	85
СЭв-2	150—240	95—120	70—95	620	95
СЭв-3	—	150—185	120—150	660	110
СЭв-4	—	240	185—240	730	120
СЭм-1	До 10	—	—	218	110
СЭм-2	16—50	—	—	222	162
СЭм-3	70—120	—	—	226	178
СЭм-4	150—240	—	—	230	184

для этих же кабелей при их прокладке по наклонной трассе наряду с латунными однофаз-

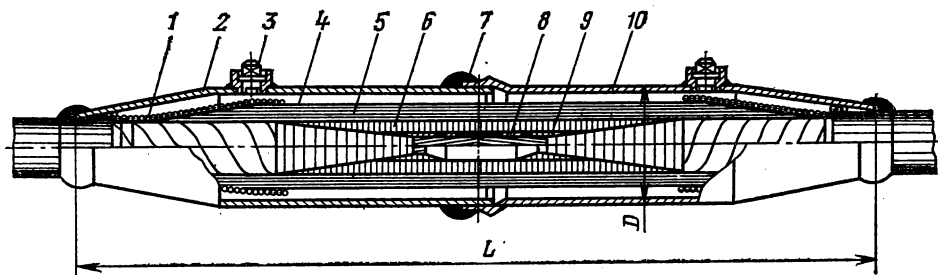


Рис. 18.14. Соединительная латунная муфта типа СЛО на 20 и 35 кВ:

1 — экран из свинцовой проволоки; 2 — полумуфта левая; 3 — пробка; 4 — экран из металлизированной бумаги; 5 — подмотка трапециевидными рулонами; 6 — подмотка роликами шириной 10 мм; 7 — пайка; 8 — гильза; 9 — подмотка роликами шириной 5 мм; 10 — полумуфта правая

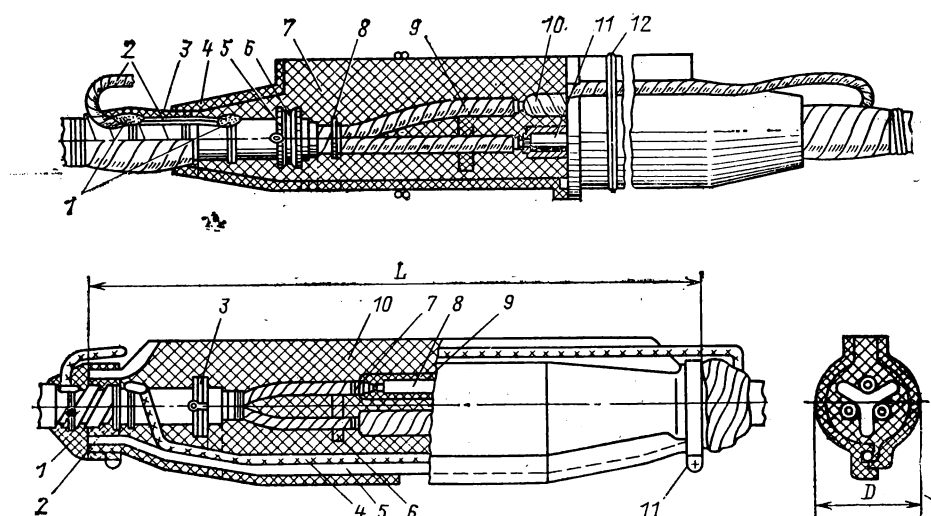


Рис. 18.15. Соединительная эпоксидная муфта на 6—10 кВ (см. табл. 18.79):

a — с поперечным разъемом типа СЭ: 1 — пайка провода заземления к оболочке и броне; 2 — провод заземления; 3 — подмотка; 4 — корпус муфты; 5 — резиновое кольцо; 6 — металлический бандаж; 7 — заливаемый компаунд; 8 — бандаж по поясной изоляции; 9 — распорка; 10 — подмотка из ленты ЛЭТСАР ЛППМ; 11 — место соединения жил; 12 — бандаж из проволоки; 6 — с продольным разъемом типа СЭВ: 1 — уплотняющая подмотка лентой ПВХ; 2 — кольцевая уплотняющая подмотка; 3 — резиновое кольцо; 4 — провод заземления; 5 — корпус муфты; 6 — распорка; 7 — бандаж из ниток; 8 — соединение жил; 9 — подмотка лентой ЛЭТСАР; 10 — компаунд; 11 — хомут

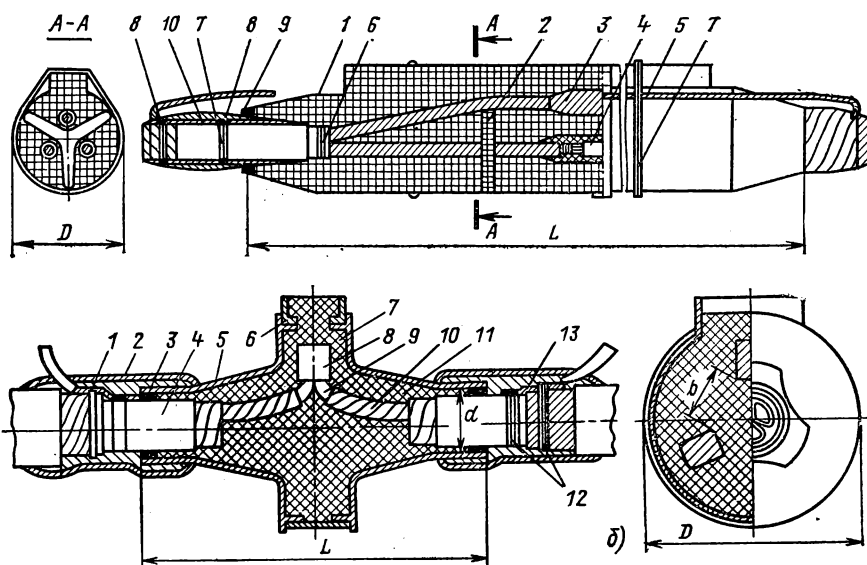


Рис. 18.16. Соединительные муфты на напряжение 1 кВ (см. табл. 18.79):

a — муфта типа СЭс: 1 — корпус муфты; 2 — распорка; 3 — подмотка соединения жил; 4 — соединение жил; 5 — провод заземления; 6 — бандаж из суровых ниток; 7 — бандаж из проволоки; 8 — пайка; 9 — уплотняющая подмотка; 10 — герметизирующая подмотка; 6 — муфта типа СЭм: 1 — подмотка из ленты ЛЭТСАР ЛПМ; 2 — то же ЛЭТСАР; 3 — уплотняющая подмотка (ЛЭТСАР ЛПМ); 4 — оболочка кабеля; 5 — корпус муфты; 6 — цилиндрическое кольцо с литником; 7 — эпоксидный компаунд; 8 — место соединения жил; 9 — жила; 10 — изоляция жилы; 11 — заливаемый компаунд; 12 — проволоочный бандаж; 13 — провод заземления

ными муфтами могут применяться эпоксидные однофазные муфты типа СЭО.

Соединение трехжильных кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение до 10 кВ производится с помощью муфт из самосклеивающихся лент — муфты типа ПССл (рис.

18.17, *a*). Одножильные кабели на 10, 20 и 35 кВ соединяются с помощью одножильных муфт из самосклеивающихся лент типа ПССл (рис. 18.17, *b*).

Для изолирования места соединения жил в этих муфтах используются самосклеивающиеся

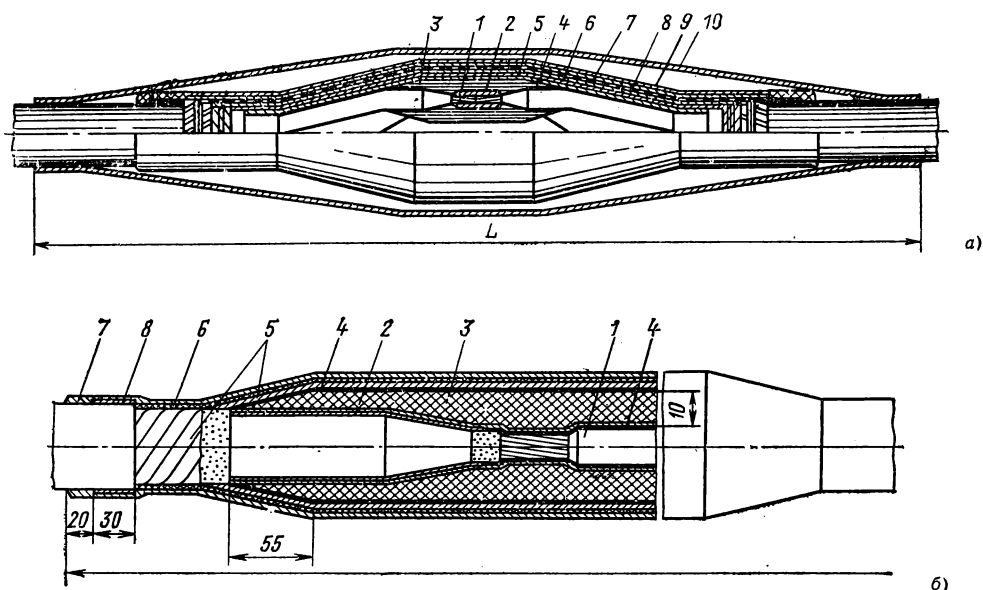


Рис. 18.17. Соединительные муфты из самосклеивающихся лент на напряжение 10 кВ:

а — муфта типа ПСсл (1 — гильза соединительная; 2 — адгезионные прослойки; 3 — восстановленная изоляция жил из ленты ЛЭТСАР; 4 — общая подмотка лентой ЛЭТСАР — поясная изоляция; 5 — полупроводящий экран из ленты ЛЭТСАР ЛПП; 6 — восстановленный металлический экран; 7 — провод заземления; 8 — бандаж; 9 — восстановленный наружный покров — трубка термоусаживаемая или лента ЛЭТСАР; 10 — кожа); *б* — муфта типа ПСОсл (1 — гильза соединительная; 2 — адгезионные прослойки; 3 — восстановленная изоляция жил из ленты ЛЭТСАР; 4 — полупроводящий экран; 5 — восстановленный металлический экран; 6 — подмотка лентой из ПВХ пластика; 7 — восстановленный наружный покров — трубка термоусаживаемая или лента ЛЭТСАР; 8 — адгезионная прослойка из ленты «А» для герметизации термоусаживаемой трубки)

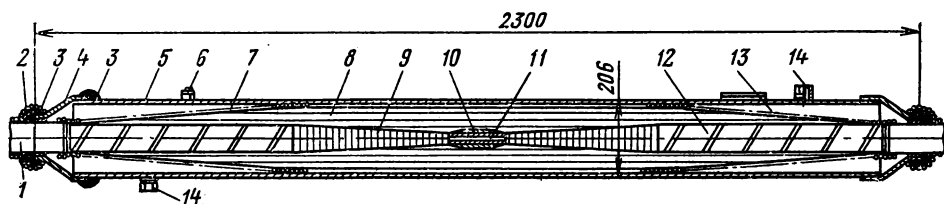


Рис. 18.18. Соединительная муфта маслонаполненного кабеля низкого давления на 220 кВ:

1 — оболочка кабеля; 2 — усиливающий провололочный бандаж; 3 — пайка; 4 — раструб; 5 — корпус муфты; 6 — болт заземления; 7 — выравнивающий конус; 8 — изоляция кабеля; 9 — разделка кабеля; 10 — соединительная гильза; 11 — жила кабеля; 12 — изоляция кабеля; 13 — изоляционное масло МН-4; 14 — заглушка

ленты на основе полиолефинов и кремнийорганических каучуков. Герметизация муфт достигается применением термоусаживаемых трубок. Для механической защиты муфты при прокладке в земле применяются защитные кожухи из стеклопластика.

Толщина подмотки самосклеивающимися лентами изоляции муфт на напряжение 10 кВ составляет 10 мм, на 35 кВ — 15 мм, длины муфт для кабелей на 6—10 кВ с сечением жил 95—240 мм² находятся в пределах 540—600 мм, для кабелей на 35 кВ — 720 мм. Диаметр муфт по термоусаживаемой трубке может быть принят соответственно 30 и 40 мм.

Конструкции соединительных муфт маслонаполненных кабелей приведены на рис. 18.18 и 18.19. Усиливающая подмотка этих муфт выполняется из предварительно пропитанной кабельной бумаги. Основным отличием соединительной

муфты для кабеля в стальной трубе от муфты для маслонаполненного кабеля низкого давления является размещение трех фаз муфт кабеля высокого давления в общем стальном корпусе.

Для предотвращения стекания пропиточного состава по кабелям с вязкой пропиткой на 1—35 кВ при их прокладке по наклонным трассам необходимо секционирование линий. Длина секции выбирается так, чтобы давление от вертикального столба пропиточной массы не нарушало герметичности муфт кабеля. На кабельных линиях 1—10 кВ для разделения линий на секции применяются обычные эпоксидные соединительные муфты.

Для кабелей на 20—35 кВ используются стопорные муфты типа СтЭО. По конструкции эти муфты аналогичны муфтам СЛЮ и отличаются от них наличием эпоксидного барьера.

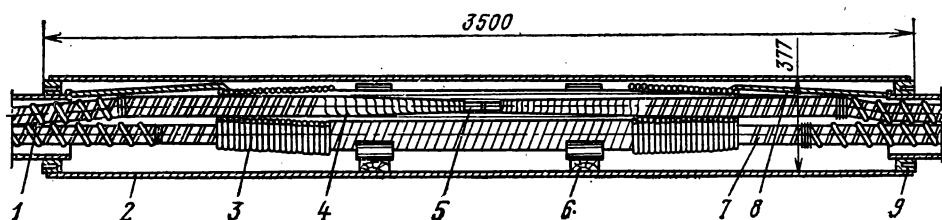


Рис. 18.19. Соединительная муфта маслонаполненного кабеля высокого давления в стальной трубе на 220 кВ:

1 — жила кабеля; 2 — корпус муфты; 3 — проволоочный экран; 4 — рулонная подмотка; 5 — соединительная гильза; 6 — подставка; 7 — медная перфорированная лента; 8 — провод заземления; 9 — переходное кольцо

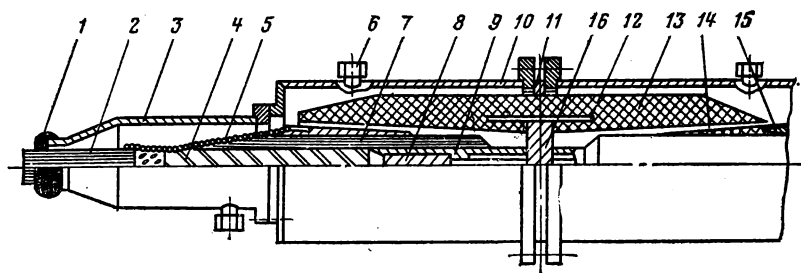


Рис. 18.20. Стопорная муфта маслонаполненного кабеля низкого давления на 110 кВ:

1 — пайка; 2 — свинцовая оболочка; 3 — элемент корпуса; 4 — изоляция кабеля; 5 — проволоочный экран; 6 — заглушка; 7 — усиливающая изоляция; 8 — жила кабеля; 9 — гильза; 10 — корпус муфты; 11 — стопорный элемент; 12 — электрод; 13 — изолятор; 14 — конусообразная насадка; 15 — заземленный электрод; 16 — стопорная перегородка

Стопорные муфты маслонаполненного кабеля предназначены для ограничения гидростатического и гидродинамического давления масла в линии. В стопорной муфте производится соединение двух строительных длин кабелей, а также разделение изолирующего масла в двух смежных секциях кабельной линии. Конструкция стопорной муфты маслонаполненного кабеля представлена на рис. 18.20. Роль стопора по маслу здесь выполняет эпоксидный стопорный изолятор.

Для оконцевания кабелей на напряжения 1, 6 и 10 кВ внутри помещения применяются концевые заделки типа КВЭ, КВсл, КВР, КВС.

Конструкция заделок типа КВЭ представлена на рис. 18.21, основные геометрические размеры — в табл. 18.80. В заделках типа КВЭ герметизация жил разделанного кабеля может осуществляться с помощью трехслойных трубок из полиэтилена и поливинилхлорида (тип КВЭт), трубок из найритовой резины (типы КВЭн), кремнийорганических трубок

(КВЭж) или термоусаживаемых поливинилхлоридных трубок (КВЭтв), надеваемых на изолированные жилы. Основания таких заделок для улучшения герметизации и увеличения механической прочности заливаются эпоксидным компаундом. В заделках типа КВсл (рис. 18.22) герметизация жил кабеля осуществляет-

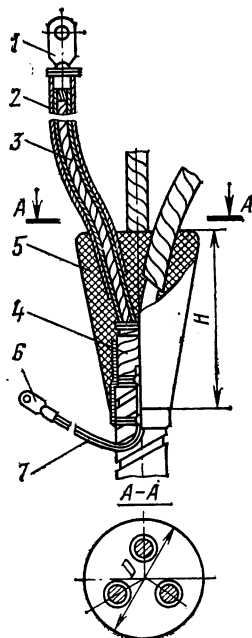


Рис. 18.21. Концевые заделки типа КВЭ (см. табл. 18.80):

1 — наконечник; 2 — трехслойная пластмассовая трубка; 3 — изолированная жила; 4 — металлическая оболочка кабеля; 5 — корпус из эпоксидного компаунда; 6 — наконечник провода заземления; 7 — провод заземления

Таблица 18.80. Геометрические размеры заделок типа КВЭ (см. рис. 18.21)

Тип размер заделки	Сечение жил трехжильного кабеля, мм ² , при напряжении, кВ			Основные размеры, мм	
	1	6	10	H	D
КВЭ-1	До 70	10—35	—	160	80
КВЭ-2	95	50	16—35	185	90
КВЭ-3	120—150	70—95	50—70	190	100
КВЭ-4	185	120—150	95—120	195	110
КВЭ-5	240	185	150	205	120
КВЭ-6	—	240	185—240	225	135

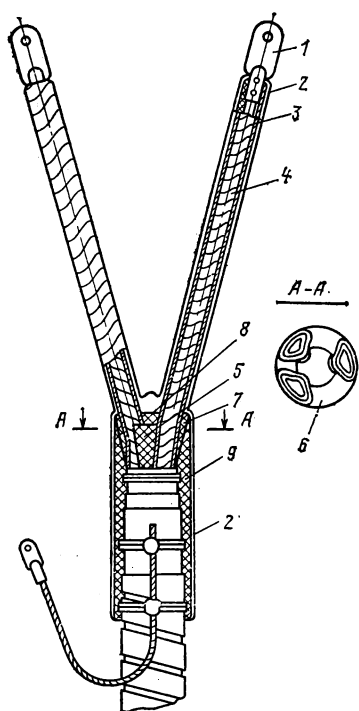


Рис. 18.22. Концевые заделки типа КВсл:

1 — наконечник; 2 — подмотка из поливинилхлоридных лент; 3 — подмотка из лент ЛЭТСАР или ЛЭТСАР ЛПТ; 4 — бумажная изоляция жилы; 5 — центральный уплотнительный конусный вкладыш; 6 — боковой уплотнительный конусный вкладыш; 7 — бандаж из ленты ЛЭТСАР; 8 — крестообразная уплотнительная подмотка; 9 — герметизирующая подмотка из лент ЛЭТСАР или ЛЭТСАР ЛПТ

ся обмоткой липкими самосклеивающимися изоляционными лентами, наложенными по оболочке кабеля и по жилам у места их разводки. Снаружи заделка защищена подмоткой из липкой поливинилхлоридной ленты.

Заделки типа КВР (рис. 18.23) и КВС выполняются в виде перчаток из наиритовой резины или свинца. Перчатки имеют цилиндрическую часть, которая герметично прикрепляется (подклеивается или припаяется) к оболочке кабеля, и трех или четырех пальцев — трубок, в которых размещаются изолированные жилы кабеля. Наиболее перспективным здесь является применение термоусаживаемых полиэтиленовых перчаток (заделки типа КВЭп).

Эти заделки могут применяться пока только для кабелей на напряжение 1 кВ.

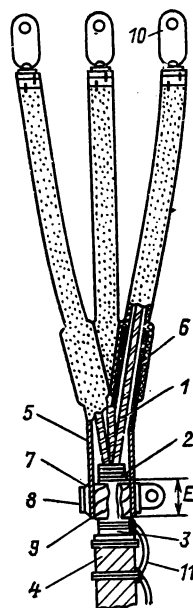
В сырых помещениях вместо концевых заделок должны применяться концевые муфты внутренней установки типа КВЭп, эти муфты имеют эпоксидные корпуса. Из корпуса муфты выводятся провода в пластмассовом шланге, жилы которых соединяются с жилами кабеля внутри муфты (рис. 18.24).

Для кабелей на напряжение 20—35 кВ внутри помещений наиболее перспективными являются эпоксидные муфты типа КВЭО (рис. 18.25).

Для оконцевания кабелей с бумажной изоляцией 6 и 10 кВ в наружных установках ис-

Рис. 18.23. Концевая заделка типа КВР для кабелей с бумажной изоляцией на напряжение 1 кВ:

1 — жилы кабеля; 2 — поясная изоляция кабеля; 3 — оболочка; 4 — броня; 5 — перчатка; 6 — резиновая трубка; 7 — подмотка прорезиненной лентой; 8 — хомут; 9 — уплотнение маслястойкой резиновой лентой; 10 — наконечник; 11 — провод заземления



пользуются металлические муфты типа КНЧ, КНА и т. д. с вертикально расположенными изоляторами (при соединении кабелей с трансформаторами и распределительными устройствами, рис. 18.26) и муфты типа КМЧ, КМА с изоляторами, расположенными наклонно, — мачтовые муфты (для соединения кабелей с воздушными линиями электропередачи, рис. 18.27). Эти муфты имеют чугунный (Ч) или алюминиевый (А) корпус и фарфоровые изоляторы. Оконцевание кабелей 1, 6 и 10 кВ может также выполняться эпоксидными муфтами типа КНЭ, у которых корпус и изоляторы отличаются из эпоксидного компаунда. Эпоксидные

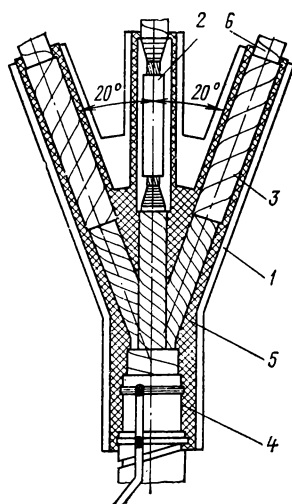


Рис. 18.24. Эпоксидная муфта типа КВЭп для оконцевания кабелей 6 и 10 кВ в сырых помещениях: 1 — эпоксидный корпус; 2 — гильза медная; 3 — изолирующая подмотка; 4 — герметизирующая подмотка; 5 — эпоксидный компаунд; 6 — выводные концы (кабель марки ВВ)

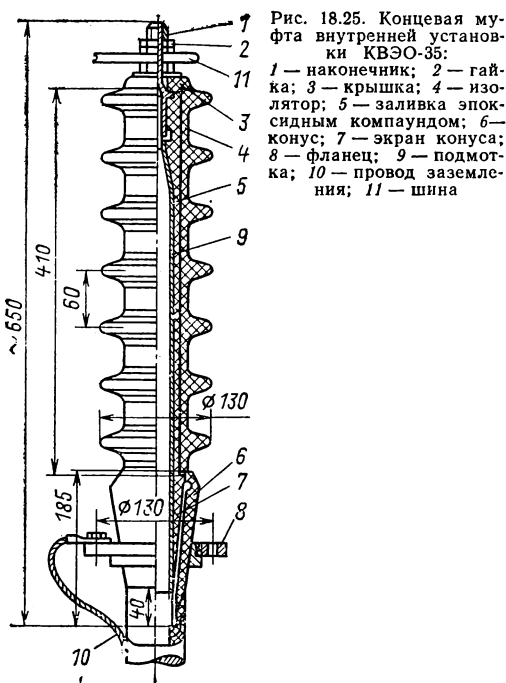


Рис. 18.25. Концевая муфта внутренней установки КВЭО-35:
1 — наконечник; 2 — гайка; 3 — крышка; 4 — изолятор; 5 — заливка эпоксидным компаундом; 6 — конус; 7 — экран конуса; 8 — фланец; 9 — подмотка; 10 — провод заземления; 11 — шина

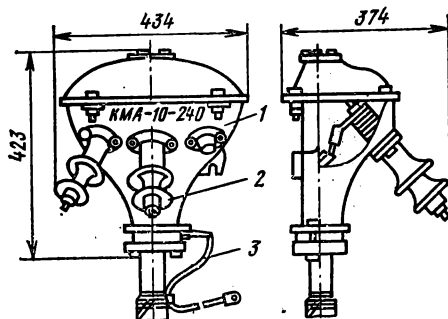


Рис. 18.27. Трехфазная мачтовая муфта типа КМЧ для трехжильных кабелей на напряжения 6 и 10 кВ:
1 — металлический корпус; 2 — фарфоровый изолятор; 3 — заземляющий провод

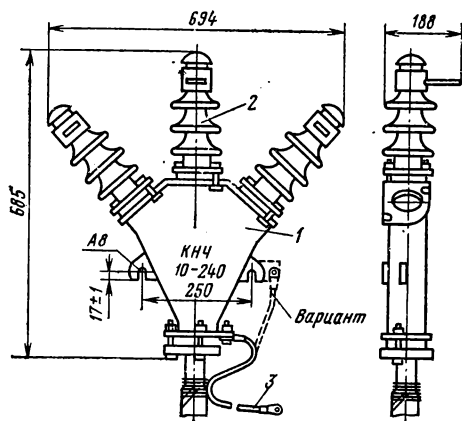


Рис. 18.26. Трехфазная концевая муфта наружной установки типа КНЧ для кабелей на напряжения 6 и 10 кВ:

1 — металлический корпус; 2 — фарфоровый изолятор; 3 — заземляющий провод

муфты легче металлических, и монтаж их значительно проще.

Оконцевание кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на напряжения 20 и 35 кВ производится однофазными муфтами с фарфоровым изолятором типа КНО и КНОк (с температурным компенсатором). В некоторых случаях можно для этих целей применять более легкие и простые в монтаже эпоксидные муфты типа КНЭО.

Для оконцевания кабелей с пластмассовой изоляцией на 10 и 35 кВ наиболее перспективными являются муфты ПКНРО-10 и ПКНРО-35 с изоляцией из эластомеров (рис. 18.28).

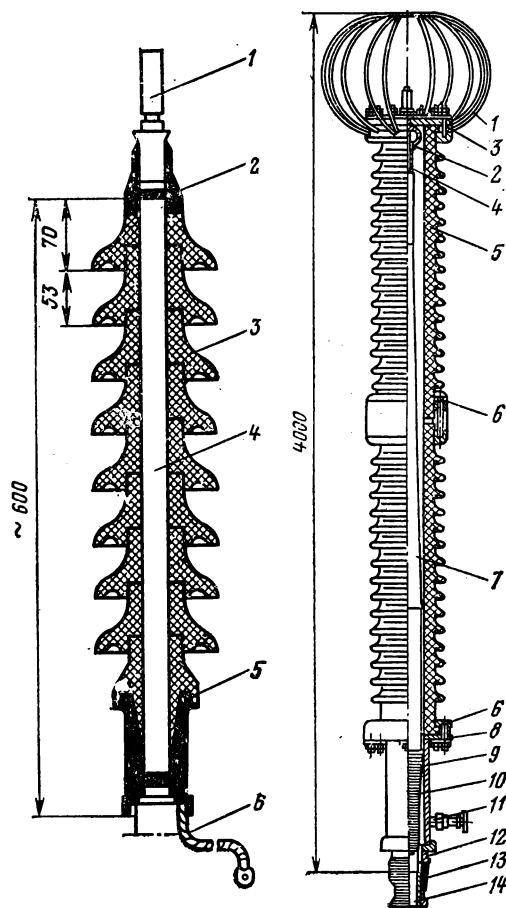


Рис. 18.28. Концевая эластомерная муфта наружной установки типа ПКНРО для кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение 35 кВ:

1 — наконечник; 2 — подмотка из самосклеивающейся ленты; 3 — юбка; 4 — кабель; 5 — выравнивающий конус; 6 — провод заземления

Рис. 18.29. Концевая муфта маслонаполненного кабеля низкого давления на напряжение 220 кВ:

1 — верхний экран; 2 — токовыводное устройство; 3 — крышка муфты; 4 — жила кабеля; 5 — изолятор; 6 — съемное соединение; 7 — концевая кабельная заделка (конденсаторная подмотка); 8 — опорная плита; 9 — металлическая труба хвостовика; 10 — выравнивающий конус; 11 — сильфонный вентиль; 12 — переходный патрубок; 13 — пайка; 14 — изоляция кабеля

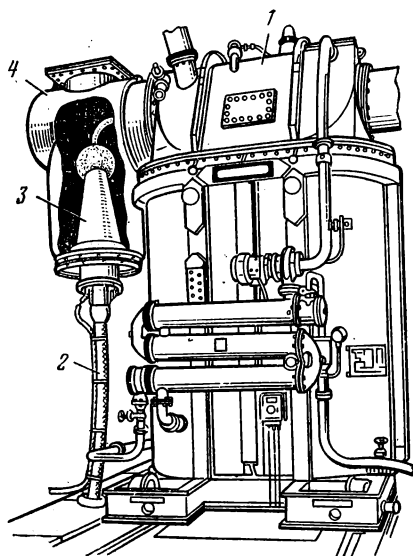


Рис. 18.30. Однофазный трансформатор со встроенным кабельным вводом:

1 — трансформатор; 2 — кабель; 3 — концевая муфта; 4 — промежуточная камера

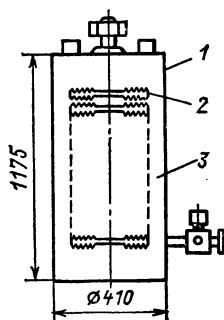


Рис. 18.31. Схема устройства бака (БД-6-0,25):
1 — корпус; 2 — батарея сифонных элементов; 3 — масло

Для оконцевания маслonaполненных кабелей применяются концевые муфты открытого типа для работы внутри помещения или в наружных установках и концевые муфты закрытого типа для ввода в аппараты высокого напряжения — трансформаторы, реакторы, распределительные устройства и т. п. Конструкция муфты открытого типа показана на рис. 18.29.

Внутренняя изоляция концевых муфт кабелей на 110 кВ и выше содержит экраны, позволяющие регулировать напряженность электрического поля внутри муфты. Кроме того, регулирование поля в муфтах на напряжения 110 кВ и выше обычно осуществляется с помощью конденсаторной подмотки или конденсаторных элементов.

Наиболее распространенными муфтами закрытого типа являются кабельные вводы в трансформатор (рис. 18.30). Их конструкция существенно отличается от концевых муфт открытого типа, так как размещение кабельной муфты в среде масла позволяет существенно уменьшить ее размеры.

Для поддержания определенного давления в кабельных линиях низкого давления применяются баки давления (рис. 18.31) марок БД-6-0,25 и БД-7-0,25. Эти же баки используются для поддержания избыточного давления в

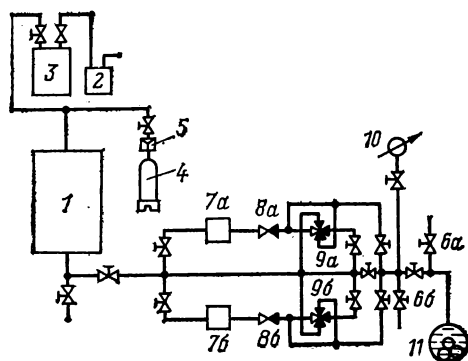


Рис. 18.32. Принципиальная схема подпитывающей установки:

1 — бак для хранения масла под вакуумом; 2 — вакуумный насос; 3 — маслоотделительный бакоч; 4 — баллон с азотом; 5 — редуктор; 6a — вентиль для взятия пробы масла из линии; 6b — вентиль для взятия пробы масла из подпитывающей установки; 7a и 7b — масляные насосы высокого давления; 8a и 8b — обратные клапаны; 9a и 9b — перепускные клапаны; 10 — манометр, контролирующий давление масла в линии; 11 — трубопровод кабельной линии

кабелях и стопорных муфтах во время их изготовления, транспортировки, хранения и монтажа. Давление масла в кабелях при подключении к линии баков поддерживается в определенных пределах за счет батарей сифонных элементов с избыточным давлением азота в них $2,45 \cdot 10^4$ Па, расположенных внутри кожуха бака. Избыточное давление масла в баках, готовых к использованию, составляет $19,6 \cdot 10^4$ — $29,4 \cdot 10^4$ Па. Отдача масла баками при изменении избыточного давления от $29,4 \cdot 10^4$ до $2,45 \cdot 10^4$ Па при 20°C составляет 50 л для бака марки БД-6-0,25 и 30 л для бака марки БД-7-0,25. Количество баков, необходимых для подпитки кабельной линии, а также места размещения пунктов подпитки определяются из расчета, учитывающего режимы работы кабельных линий, условия прокладки и профиль трассы. Расстояние между подпитывающими пунктами для маслonaполненных кабелей низкого давления обычно лежит в пределах от 1 до 2 км.

Для поддержания давления в маслonaполненных кабелях высокого давления применяется автоматическая подпитывающая насосная установка (рис. 18.32). Основными частями установки являются: бак для хранения масла под вакуумом, масляный насос, подающий масло из бака в линию, если давление падает ниже 1,4 МПа, перепускной вентиль, автоматически пропускающий масло из линии в бак при повышении давления свыше 1,6 МПа. Основные узлы в установке дублированы для обеспечения ее надежной работы.

Для обеспечения работы линии длиной 3 км достаточно установки емкостью бака около 4000 л.

18.13. КОНТРОЛЬНЫЕ КАБЕЛИ И КАБЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ

Контрольные кабели применяются для подведения маломощных низковольтных управляющих сигналов к разнообразным техническим

устройствам и съема информации о характере протекающих в них процессов. В настоящее время контрольные кабели выпускаются преимущественно с резиновой и пластмассовой изоляцией. В соответствии с ГОСТ 1508-78 они предназначены для неподвижного присоединения к электрическим приборам, аппаратам, сборкам зажимов электрических распределительных устройств номинальным переменным напряжением до 660 В частотой до 100 Гц или постоянным до 1000 В.

Токопроводящие жилы контрольных кабелей изготавливаются из медной (М) или алюминиевой (А) проволоки. Установлены следующие размерные ряды для сечений токопроводящих жил, мм²: медных — 0,75; 1,0; 1,5; 2,5; 4; 6; алюминиевых — 2,5; 4; 6; 10.

Изоляция изготавливается из кабельной пропитанной бумаги (в ограниченном масштабе), резины (Р), поливинилхлоридного пластика (В), полиэтилена низкой плотности (П), самозатухающего полиэтилена (Пс), вулканизованного полиэтилена, фторопласта.

Изолированные жилы скручиваются в сердечник, который может состоять из следующего числа изолированных жил: 4, 5, 7, 10, 14, 19, 37, 52, 61. Поверх сердечника накладывается обмотка лентами из бумаги или синтетических пленок для обеспечения механической устойчивости и облегчения наложения оболочки из пластмасс или резины. Для оболочки используются следующие материалы: свинец (С), негорючая резина (Н), поливинилхлоридный пластикат (В). В зависимости от условий прокладки и эксплуатации применяются следующие виды броневых и защитных покрытий: а) броня из двух стальных лент с противокоррозийным покрытием (БГ) или из одной профилированной (БоГ) — при прокладке внутри помещений, в каналах, туннелях, если кабель не подвергается воздействию значительных растягивающих усилий; б) броня из двух стальных лент с наружным защитным покровом (Б) или в шланге из поливинилхлоридного пластика (БоШв) — при прокладке в земле (траншеях), если кабель не подвергается воздействию значительных растягивающих усилий; в) броня из оцинкованных проволок с наружным защитным покровом или в шланге из поливинилхлоридного пластика (ПоШв) — при прокладке в каналах, туннелях, земле (траншеях), если кабель подвергается воздействию значительных растягивающих усилий; г) броня из круглых стальных оцинкованных проволок с наружным защитным покровом (К) или в шланге из поливинилхлоридного пластика — при прокладке под водой и в местах, где кабель подвергается значительным растягивающим усилиям. При прокладке в помещениях, каналах, туннелях и при отсутствии механических воздействий на кабель броневой покров отсутствует (Г).

По степени защищенности от внешних помех контрольные кабели изготавливаются неэкранированными и экранированными (в общем экране) (Э).

В контрольных кабелях общего применения, эксплуатируемых в естественных условиях и не имеющих ограничения по габаритам и массе, применяется резиновая изоляция. В аналогичных кабелях, а также в кабелях, приме-

няемых в пожароопасных местах и местах с повышенной концентрацией химически агрессивных веществ, используется изоляция из поливинилхлоридного пластика. Для кабелей, габариты и масса которых ограничены и которые эксплуатируются в естественных условиях, применяется изоляция из полиэтилена низкой плотности. В аналогичных кабелях, эксплуатируемых в пожароопасных помещениях, используется изоляция из самозатухающего полиэтилена. Для кабелей с повышенной надежностью, для кабелей с жесткими ограничениями по габаритам и массе при повышенных плотностях тока, для кабелей, эксплуатируемых в пожароопасных помещениях и в среде с повышенной химической активностью, применяется изоляция из сополимера тетрафторэтилена (фторопласт 40Ш).

Технические данные жил контрольных кабелей приведены в табл. 18.81—18.87.

Кабели управления, как и контрольные кабели, используются для передачи маломощных низковольтных сигналов. Однако в отличие от последних они используются при существенно различающихся условиях эксплуатации (подвижная эксплуатация, необходимость обеспечения защиты от взаимных и внешних помех, увеличенное число электрических цепей в кабеле, стойкость к действию различных меха-

Таблица 18.81. Толщина изоляции жил контрольных кабелей

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Номинальная толщина изоляции, мм			
	резиновой	из поливинилхлоридного пластика	полиэтиленовой	фторопластовой
0,75	1,0	0,6	0,6	0,3
1,0—1,5	1,0	0,6	0,6	0,3
2,5	1,0	0,6	0,6	0,5
4	1,0	0,7	0,6	0,5
6	1,2	0,7	0,6	0,5
10	1,2	0,9	0,8	0,8

Таблица 18.82. Толщина резиновых и поливинилхлоридных оболочек контрольных кабелей

Диаметр кабеля под оболочкой, мм	Номинальная толщина оболочки, мм	
	резиновой	из поливинилхлоридного пластика
До 6	1,5	1,2
6—10	1,7	1,5
10—15	2,0	1,5
15—20	2,0	1,7
20—30	2,5	1,7
23—25	2,5	1,7
25—26	3,0	1,9
26—30	3,0	1,9
30—33	3,0	2,1
33—36	3,0	2,1
36—40	3,0	2,1
Свыше 40	4,0	2,3

Т а б л и ц а 18.83. Толщина свинцовых оболочек контрольных кабелей, мм

Диаметр ка- беля под оболочкой	Для кабелей, ра- ботающих под водой	Для остальных кабелей
До 20	1,05	0,95
20—22,5	1,10	1,00
22,5—25	1,15	1,05
25—27,5	1,20	1,10
27,5—30	1,25	1,16
30—32,5	1,31	1,23
32,5—35	1,37	1,28
35—37,5	1,43	1,37
37,5—40	1,49	1,46
40—42,5	1,55	1,56
Свыше 42,5	1,60	1,60

нических, климатических воздействий и др.), которые определяют специфику конструкций этой группы кабелей.

В соответствии с ГОСТ 18404.0-78 «Кабели управления. Общие технические условия» кабели управления предназначены для передачи сигналов малой мощности переменным или импульсным напряжением до 1000 В частотой до 5000 Гц или постоянным до 1400 В от датчиков к аппаратуре контроля и используются для дистанционного управления исполнительными механизмами при подвижном присоединении.

Т а б л и ц а 18.84. Основные электрические показатели контрольных кабелей

Показатель	Кабели контрольные				
	с полиэтиленовой изоляция	с резиновой изоля- цией	с изоляцией из поли- винилхлоридного пластката	с полиэтиленовой изоляция и поли- винилхлоридной оболочкой	с фторопластовой изоляция
Электрическое со- противление изоля- ции в нормальных условиях, 10^3 МОм·м, не менее	300	60	6	1000	50
Испытательное на- пряжение частотой 50 Гц В:					
в состоянии по- ставки	—	2500	—	1500	2000
на протяжении срока службы	—	—	—	1000	2000

Одним из признаков, отличающих конструкции кабелей управления, является сочетание материалов, используемых для изготовления изоляции и оболочки. Возможные сочетания этих материалов приведены в табл. 18.88.

Т а б л и ц а 18.85. Контрольные кабели

Марка	Материал жилы	Сечение токо- проводящей жилы, мм ²	Число изолированных жил
Кабели с резиновой изоляцией: КРСГ, КРСБ, КРСБГ, КРСК ¹	М М	1; 1,5; 2,5 4; 6	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37 4, 7, 10
КРВГ, КРВГЭ, КРВБ, КРНБ, КРВБГ, КРВБ6Г, КРНГ, КРНБГ, КРБ6Г	М	0,75; 1,0; 1,5	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37, 52
АКРВГ, АКРВГЭ	А	2,5 4, 6, 10	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37 4, 7, 10
КРВБ, АКРВБ, КРВБГ, АКРВБГ, КРВБ6Г, АКРВБ6Г, КРНГ, АКРНГ, КРНБ, АКРНБ, КРНБГ, АКРНБГ, КРНБ6Г, АКРНБ6Г	М, А М, А А	2,5 4; 6 10	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37 4, 7, 10 4, 7, 10
Кабели с поливинилхлоридной изоляцией: КВВГ, КВВГЭ, АКВВГ, АКВВГЭ, КВВБ, АКВВБ, КВВБГ, АКВВБГ, КВВБ6Г, АКВВБ6Г, КВБ6Шв ¹ , АКВБ6Шв ¹ , КВБ6Шв ¹	М М, А М, А А	0,75; 1,0; 1,5 2,5 4; 6 10	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37, 52, 61 4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37 4, 7, 10 4, 7, 10
Кабели с полиэтиленовой изоляцией: КПВГ, АКПВГ, КПВБ, АКПВБ, КПВБГ, АКПВБГ, КПВБ6Г, АКПВБ6Г, КПБ6Шв, АКПБ6Шв, АКПБ6Шв, КПБ6Шв ¹ , КПСВГ, АКПСВГ, КПСВГЭ, АКПСВГЭ, КПСВБ, АКПСВБ, КПСВБГ, АКПСВБГ, КПСВБ6Г, АКПСВБ6Г, АКПСБ6Шв, КПСБ6Шв ² , КПСБ6Шв ²	М М, А М, А А	0,75; 1,0; 1,5 2,5 4; 6 10	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37, 52, 61 4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37 4, 7, 10 4, 7, 10

¹ Кабели изготавливаются с числом жил 10—37 при 1,0—1,5 мм², 7—37 при 2,5 мм² и 7, 10 при 4 и 6 мм².

² Кабели изготавливаются с числом жил 10—37 при 0,75; 1,0 и 1,5 мм², 7—37 при 2,5 мм² и 7, 10 при 4 и 6 мм².

Продолжение табл. 18.85

Марка	Материал жилы	Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Число изолированных жил
Кабель с изоляцией из полиэтилена высокой плотности КПВБ	М	1,0	24, 37, 52
	М	1,5	24, 37, 52
	М	2,5	24, 37, 52
Кабель с изоляцией из фторпласта-40Ш КФР	М	1,5	3, 5, 7, 12, 19

Таблица 18.86. Основные механические параметры контрольных кабелей

Параметры	Контрольные кабели				
	бронированные в свинцовой оболочке	небронированные в свинцовой оболочке	в прочих оболочках	КПВБ	КФР
Радиус изгиба при монтаже, не менее (кратность по отношению к наружному диаметру кабеля)	12	10	6—12	5	5
Изгибы при эксплуатации	Не допускаются				100 двойных перегибов

При отсутствии требований по помехозащищенности кабели управления выполняются неэкранированными. Если требуется защита цепей от взаимных помех, то кабели изготавливают со всеми экранированными жилами или с частью таких жил.

Если требуется защита от внешних помех, кабели изготавливают в общем (одинарном или двойном) экране. По составу и строению сердечника кабели управления могут быть однородными (сердечник состоит из экранированных или неэкранированных жил одного сечения), неоднородными (жилы разного сечения) или комбинированными (сердечник состоит из различных по назначению цепей — контроля и управления, силовых, высокочастотных и др.).

В соответствии с ГОСТ 18404.0-78 для кабелей управления установлены следующие ряды:

сечения токопроводящих (медных, гибких) жил: 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,5 мм²;

Таблица 18.87. Параметры, характеризующие стойкость кабелей к эксплуатационным воздействиям и их надежность

Параметр	Контрольные кабели				
	с изоляцией из ПВХ пластика		с полиэтиленовой изоляцией	КПВБ	КФР
	в оболочке из ПВХ пластика без наружного покрова и в шланге из ПВХ пластика	в других оболочках			
Температура окружающей среды, °С	-50÷+50			-50÷+50	-50÷+50
Предельно допустимая температура жилы, °С	70	65	65	70	150
Предельно допустимая относительная влажность окружающей среды	98 % при температуре до 40 °С			90 % при температуре до 40 °С	
Стойкость к воздействию химических агрессивных сред	Стойки	Нестойки		Стойки	Стойки
Стойкость к вибрационным нагрузкам	Не нормирована			Частота 1—600 Гц	Не нормирована
Стойкость к многократным ударам	То же			Ускорение до 100 м/с²	То же
Стойкость к одиночным ударам	Не нормирована			Ускорение до 350 м/с²; до 1500 м/с²	» »
Срок службы	15—20 лет			5—12 лет	8 лет

Таблица 18.88. Сочетания материала изоляции жил и оболочки в кабелях управления

Материал изоляции	Материал оболочки
Резина нормальной нагревостойкости Поливинилхлоридный пластикат Полиэтилен высокой плотности То же	Резина нормальной нагревостойкости Поливинилхлоридный пластикат То же
Полиэтилен — капрон Фторопласт То же	Резина нормальной нагревостойкости То же » Кремнийорганическая резина То же
Кремнийорганическая резина Фторопласт	Резина на основе фторкаучука

число изолированных жил однородных кабелей управления: 3, 4, 7, 14, 19, 27, 30, 37, 52, 61, 91, 108.

Ряд рабочих и испытательных напряжений приведен в табл. 18.89.

Принципы маркирования кабелей управления регламентированы ГОСТ 18404.0-78. Каждому кабелю присваивают марку, состоящую из буквенных обозначений, указывающих (последовательно): группу кабелей (КУ), материал изоляции (согласно табл. 18.90), наличие общего экрана (одинарного Э, двойного ЭЭ), материал оболочки (табл. 18.90), наличие панцирной оплетки (П). Если изоляция жил и оболочки кабеля выполнена из однотипного материала, то в обозначение марки входит только одна буква, соответствующая данному материалу.

По нагревостойкости кабели управления делятся на две группы — кабели нормальной и повышенной нагревостойкости.

Из кабелей нормальной нагревостойкости (максимальная температура длительной экс-

Таблица 18.89. Ряд рабочих и испытательных напряжений для кабелей управления

Рабочее напряжение, В		Испытательное переменное напряжение (частота 50 Гц), В
переменное	постоянное	
100	150	1000
250	350	1500
500	700	2500
1000	1400	3000

Таблица 18.90. Буквенное обозначение материала изоляции или оболочки в маркировке кабелей управления

Материал изоляции или оболочки	Условное обозначение
Резина изоляционная и шланговая нормальной нагревостойкости	Р
Поливинилхлоридный пластикат	В
Полиэтилен	П
Полиэтилен — капрон	ПК
Фторопласт	Ф
Кремнийорганическая резина	С
Резина на основе фторкаучука	ФС
Лавсан	Л
Капрон	К
Фенилон	ФН

плуатации не превышает 70 °С) кабели с резиновой изоляцией и оболочкой в основном применяются для подвижной эксплуатации, с полиэтиленовой изоляцией и с оболочкой из поливинилхлоридного пластика — для фиксированной прокладки, с оболочкой из резины — для подвижной эксплуатации, с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридных пластика — в основном для неподвижной прокладки в пожароопасных помещениях при возможности контакта с техническими маслами, бензином и другими агрессивными средами. Наиболее надежной конструкцией кабелей управления нормальной нагревостойкости является конструкция с комбинированной изоляцией из полиэтилена и капрона и резиновой оболочкой. Эти кабели могут применяться для подвижной эксплуатации в сложных атмосферных условиях.

К кабелям управления повышенной нагревостойкости относятся кабели с изоляцией из фторопласта-4ОШ (180 °С), кремнийорганической резины (200 °С) и фторопласта-4 (250 °С). Они применяются для специальных целей и используются в тех случаях, когда температура окружающей среды находится в пределах 100—250 °С. Кабели с изоляцией из фторопласта-4ОШ и фторопласта-4 с оболочками из кремнийорганической резины или резины на основе фторкаучуков применяются для неподвижной прокладки.

Для подвижной эксплуатации используют кабели с изоляцией и оболочкой из кремнийорганической резины.

Сортамент и основные технические параметры кабелей управления приведены в табл. 18.91.

Таблица 18.91. Сортамент и основные технические параметры кабелей управления

Марка кабеля	Сечение жилы, мм ²	Число жил (число экранированных жил)	Толщина изоляции (толщина изоляции экранированных жил) мм	Толщина оболочки		Наружный диаметр кабеля (наружный диаметр кабелей с экранированными жилами), мм	Расчетная масса (расчетная масса с экранированными жилами), кг/км	Примечание
				внутренней	наружной			
КРШУ	1,0	4—37	0,8	—	2—2,5	13,1—29,3	200—1180	Изоляция — резина; экран — медная луженая проволока (МЛП); обмотка — прорезиненная ткань; оболочка — резина
КРШУЭ	1,0	4—37	0,9	—	2—2,5	16—37,7	300—1940	

Продолжение табл. 18.91

Марка кабеля	Сечение жил, мм ²	Число жил (число экранированных жил)	Толщина изоляции (толщина изоляции экранированных жил, мм)	Толщина оболочки		Наружный диаметр кабеля (наружный диаметр кабелей с экранированными жилами), мм	Расчетная масса (расчетная масса с экранированными жилами), кг/км	Примечание
				внутренней	наружной			
КУПВ	0,35	7—108 (7—52)	0,31 (0,46)	—	1,4—2,1	7,5—22,6 (10,1—24,7)	68—684 (129—791)	Изоляция — полиэтилен; экран — медная луженая проволока; оболочка — поливинилхлоридный пластикат; обмотка — полиамидная или полиэтилентерефталатная пленка; панцирная оплетка: стальная оцинкованная проволока, стальная нержавеющая проволока, медная луженая проволока
	0,50	7—108 (7—52)	0,30 (0,45)	—	1,4—2,1	7,8—23,8 (10,4—25,6)	79—829 (140—870)	
КУПВ-П КУПВ-Пн	0,35	7—108 (7—52)	0,31 (0,46)	—	1,4—2,1	8,7—23,8 (11,3—25,9)	114—802 (191—910)	
	0,50	7—108 (7—52)	0,30 (0,45)	—	1,4—2,1	9—25 (11,6—26,8)	125—956 (211—997)	
КУПВ-Пм	0,35	7—108 (7—52)	0,31 (0,46)	—	1,4—2,1	8,7—23,8 (11,3—25,9)	122—822 (202—931)	
	0,50	7—108 (7—52)	0,30 (0,46)	—	1,4—2,1	9—2,5 (11,6—26,8)	133—977 (211—1019)	
КУПР	0,35	4—108 (4—52)	0,31 (0,46)	—	1,4—2,4 (1,6—2,4)	7,3—23,8 (0,3—25)	58—747 (106—856)	Изоляция — полиэтилен; экран — медная луженая проволока; оболочка — резина; обмотка — полиамидная или полиэтилентерефталатная пленка; обмотка — прорезиненная ткань; панцирная оплетка: стальная оцинкованная проволока, стальная нержавеющая проволока, медная луженая проволока
	0,50	4—108 (4—52)	0,30 (0,45)	—	1,4—2,4 (1,6—2,4)	7,5—25 (9,8—27)	65—896 (113—937)	
	0,75	4—37 (4—37)	0,40 (0,45)	—	1,6—2,2 (1,6—2,0)	8,6—20,2 (10,3—18,3)	92—515 (130—450)	
	1,0	4—37 (4—19)	0,42 (0,52)	—	1,6—2,2 (1,6—2,2)	9—21,8 (11,4—20,3)	103—687 (154—568)	
	1,50	4—37 (4—19)	0,40 (0,50)	—	1,6—2,4 (1,6—2,4)	10,3—24,5 (12,9—23)	134—667 (207—824)	
КУПР-П КУПР-Пн	0,35	4—108 (4—52)	0,38 (0,46)	—	1,4—2,4 (1,6—2,4)	8,5—25 (10,5—27,2)	103—869 (168—984)	Изоляция — полиэтилен; экран — медная луженая проволока; обмотка — полиамидная или полиэтилентерефталатная пленка; обмотка — прорезиненная тканевая лента; оболочка — резина; панцирная оплетка — стальная нержавеющая проволока (КУПР-Пн), стальная оцинкованная проволока (КУПР-П)
	0,50	4—108 (4—52)	0,30 (0,45)	—	1,4—2,4 (1,6—2,4)	8,7—25,2 (14,0—28,2)	110—1021 (175—1067)	
	0,75	4—37 (4—19)	0,40 (0,45)	—	1,6—2,2 (1,6—2,0)	9,8—21,4 (11,5—19,5)	141—627 (194—549)	
	1,0	4—37 (4—19)	0,42 (0,52)	—	1,6—2,2 (1,6—2,2)	10,2—23 (12,6—21,5)	157—740 (222—686)	
	1,50	4—37 (4—19)	0,40 (0,50)	—	1,6—2,4 (1,6—2,4)	11,5—25,7 (14,1—24,2)	190—995 (275—981)	
КУПР-Пм	0,35	4—108 (4—52)	0,31 (0,46)	—	1,4—2,4 (1,6—2,4)	8,5—25 (10,5—27,2)	111—890 (178—1006)	Изоляция — полиэтилен; экран — медная луженая проволока; обмотка — полиамидная или полиэтилентерефталатная пленка; обмотка — прорезиненная тканевая лента; оболочка — резина; панцирная оплетка — медная луженая проволока
	0,50	4—108 (4—52)	0,30 (0,45)	—	1,4—2,4 (1,6—2,4)	8,7—25,2 (11,0—28,2)	118—1043 (186—1090)	
	0,75	4—37 (4—19)	0,40 (0,45)	—	1,6—2,2 (1,6—2,0)	9,8—21,4 (11,5—19,5)	148—645 (203—565)	
	1,0	4—37 (4—19)	0,42 (0,52)	—	1,6—2,2 (1,6—2,2)	10,2—23,0 (12,6—21,5)	165—760 (233—706)	
	1,50	4—37 (4—19)	0,40 (0,50)	—	1,6—2,4 (1,6—2,4)	11,5—25,7 (14,1—24,2)	200—1016 (286—972)	
КУПКЭР	0,50	12	0,3	—	2,0	1,3	209	Изоляция — комбинированная из полиэтилена и капрона; экран — медная луженая проволока; обмотка — полиамидная или полиэтилентерефталатная пленка; оболочка — резина; панцирная оплетка — медная луженая проволока
	0,75	4	0,3	—	1,8	10,0	119	
КУПКЭР-П	0,50	12	0,3	—	2,0	14,2	295	
	0,75	4	0,3	—	1,8	11,2	185	
		7	0,3	—	2,0	12,7	244	
КУПКР-П	0,50	12	0,35	—	1,4	11,8	183	Изоляция — комбинированная из полиэтилена и капрона; обмотка — полиамидная или полиэтилентерефталатная пленка; оболочка — резина; панцирная оплетка — стальная нержавеющая проволока
	—	37	0,35	—	1,5	17,2	404	
	1,0	27	0,35	—	1,6	18,6	507	

Продолжение табл. 18.91

Марка кабеля	Сечение жилы, мм ²	Число жил (число экранированных жил)	Толщина изоляции (толщина изоляции экранированных жил мм)	Толщина оболочки		Наружный диаметр кабеля (наружный диаметр кабелей с экранированными жилами), мм	Расчетная масса (расчетная масса с экранированными жилами), кг/км	Примечание
				внутренней	наружной			
КФШР	0,20	24 (7)	0,25 (0,35)	—	2,4	12,6	233	Изоляция — фторопласт-4ОШ; экран — медная луженая проволока; обмотка — пленка из фторопласта-4; оболочка — резина
	0,35	45 (7)	0,25 (0,35)	—	3,4	18,3	511	
	0,50	10—48	0,25	—	2,4—3,2	10,6—18	155—529	
КФШЭР	0,20	10	0,25	—	2,4	10,9	170	Изоляция — фторопласт-4ОШ; экран — медная луженая проволока; обмотка — пленка из фторопласта-4ОШ; двойной экран — медная луженая проволока; оболочка — резина
	0,35	19	0,25	—	2,5	13,2	282	
КБФРТ	0,50	12	0,3	—	2,0	12,3	182	Изоляция — фторопласт-4ОШ; обмотка — пленка из фторопласта-4; экран — медная луженая проволока, оболочка — резина
		24		—	—	15,2	434	
	0,75	4 7		—	1,5	8,8 9,8	147 192	
КУДФРУ	0,20	3—52	0,30 (0,40)	1,2—1,5 (1,2—1,5)	1,4—1,5 (1,5—1,6)	1,71 (19,5)	82—399 (267—548)	Изоляция — фторопласт-4ОШ; обмотка — пленка из фторопласта-4; экран — из медных луженых проволок; внутренняя оболочка — резина; оплетка — лавсановый шелк; наружная оболочка — резина
	0,35	3—52	0,31 (0,41)	1,2—1,5 (1,2—1,5)	1,4—1,7 (1,4—1,5)	19,2 (15,4)	94—540 (132—322)	
	1,0	61	0,40	1,8	2,0	2,75	1288	
	1,50	3—52	0,40	1,2—1,8	1,5—2,0	28,8	167—1467	
КУДФЭРУ	0,20	3—52	0,30	1,2—1,5	1,4—1,7	18,9	107—522	
	0,35	3—52	0,31	1,2—1,6	1,4—1,8	21,0	119—679	
КУС	0,12	7	0,50	—	1,0	8,6	93,5	Изоляция — кремнийорганическая резина; экран — посеребренная проволока; обмотка — пленка из фторопласта-4; оболочка — кремнийорганическая резина
	0,5	1	1,0	—	1,0	8,6	93,5	
КФРВ	0,50	19	0,25	—	1,7	12,3	204	Изоляция — фторопласт-4ОШ; обмотка — пленка из фторопласта-4; оболочка — кремнийорганическая резина; оплетка — лавсановый шелк
КУФЭФС	0,35	12	0,3	—	1,2	9,2	166	Изоляция — фторопласт-4ОШ; обмотка — пленка из фторопласта-4; экран — медная луженая проволока; обмотка — пленка из фторопласта-4; оболочка — фторкаучук
	0,50	4	0,3	—	1,2	7,0	93	
	0,75	2—12	0,3	—	1,2	6,8—8,6	82—166	

18.14. СИЛОВЫЕ И УСТАНОВОЧНЫЕ ПРОВОДА И СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ ШНУРЫ

Силовые и установочные провода с резиновой и пластмассовой изоляцией для электротехнических установок служат для распределения энергии силовых и осветительных установок при неподвижной прокладке на открытом воздухе и внутри помещений, а провода некоторых марок — при открытой проводке в

трубах или под штукатуркой, а также для питания электродвигателей и подключения промышленных и лабораторных переносных аппаратуры и приборов.

Провода изготавливаются на переменные напряжения 380, 660 и 3000 В. Номенклатура проводов для электротехнических установок и преимущественные области применения приведены в табл. 18.92, сортамент, наружные диаметры (или размеры) проводов и массы — в табл. 18.93—18.99, допустимые токовые нагрузки — в табл. 18.65.

Таблица 18.92. Марки, элементы конструкции и области применения силовых и установочных проводов

Марка	Наименование элементов проводов	Преимущественные области применения	ГОСТ или ТУ
<i>Провода силовые с резиновой изоляцией</i>			
ПРТО	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией, в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной противогнилостным составом	Для прокладки в негорюемых трубах	ГОСТ 20520-80
АПРТО	То же с алюминиевой жилой	То же	ГОСТ 20520-80
ПРН	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией, в негорючей резиновой оболочке	Для прокладки в сухих и сырых помещениях, в пустотных каналах негорюемых строительных конструкций, а также на открытом воздухе	ГОСТ 20620-80
АПРН	То же с алюминиевой оболочкой	То же	ГОСТ 20520-80
ПРГН	То же с медной гибкой жилой	Для прокладки при повышенной гибкости при монтаже и для соединения подвижных частей электрических машин в сухих и сырых помещениях, а также на открытом воздухе	ГОСТ 20520-80
ПРИ	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией, обладающей защитными свойствами	Для прокладки в сухих и сырых помещениях	ГОСТ 20520-80
АПРИ	То же с алюминиевой жилой	То же	ГОСТ 20520-80
ПРГИ	То же с медной гибкой жилой	Для прокладки при повышенной гибкости при монтаже и для соединения подвижных частей электрических машин в сухих и сырых помещениях	ГОСТ 20520-80
АППР	Провод с алюминиевой жилой, с резиновой изоляцией, не распространяющей горение, с разделительным основанием	Для прокладки по деревянным поверхностям и конструкциям жилых и производственных сельскохозяйственных помещений и животноводческие помещения	ГОСТ 20520-80
ПРД	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией, в непропитанной оплетке, двухжильный, скрученный	В осветительных сетях сухих помещений	ТУ 16-505.904-76
ПРВД	Провод гибкий, с медной жилой, с резиновой изоляцией, двухжильный, скрученный, в поливинилхлоридной оболочке	В осветительных сетях сухих и сырых помещений	ТУ 16-505.904-76
АРТ	Провод с алюминиевой жилой, с резиновой изоляцией, с несущим тросом	Прокладка внутри помещений в сетях напряжением 660 В, где требуется повышенная механическая прочность	ГОСТ 14175-78
ПРТ	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией, в оплетке из стальных оцинкованных проволок	В осветительных и силовых цепях, вторичных сетях стационарных установок и механизмов при наличии легких механических воздействий на провод и отсутствии воздействия масел и эмульсий	ГОСТ 1843-78
ПРРП	То же в резиновой оболочке	В осветительных и силовых цепях, вторичных сетях, в экскаваторах, машинах и механизмах при наличии механических воздействий на провод, воздействия масел, эмульсий	ГОСТ 1843-78
ПРФ	Провод с медной жилой, в резиновой изоляции, в фальцованной оболочке из сплава марки АМЦ	В осветительных и силовых сетях в сухих помещениях при наличии легких механических воздействий на провод (проводки в лестничных клетках, клубах, театрах и т. п.)	ГОСТ 1843-78
АПРФ	То же с алюминиевой жилой	То же	ГОСТ 1843-78
ПРФл	То же в оболочке из латуни	» »	ГОСТ 1843-78
<i>Провода с пластмассовой изоляцией</i>			
ПВ1	Провод с медной жилой и поливинилхлоридной изоляцией	Для монтажа вторичных цепей, прокладки в трубах, пустотных каналах негорюемых строительных конструкций и для монтажа силовых и осветительных цепей в машинах и станках	ГОСТ 6323-79
АПВ	Провод с алюминиевой жилой и поливинилхлоридной изоляцией	То же	ГОСТ 6323-79
ПВ2	Провод с медной жилой с поливинилхлоридной изоляцией, гибкий	Для монтажа вторичных цепей и гибкого монтажа при скрытой и открытой прокладках	ГОСТ 6323-79
ПВ3	То же повышенной гибкости	То же	ГОСТ 6323-79
ПВ4	То же особо гибкий	То же для особо гибкого монтажа	ГОСТ 6323-79

Продолжение табл. 18.92

Марка	Наименование элементов проводов	Преимущественные области применения	ГОСТ или ТУ
ППВ	Провод с медными жилами и поливинилхлоридной изоляцией, плоский с разделительным основанием	Для монтажа силовых и осветительных цепей в машинах и станках и для неподвижной открытой прокладки	ГОСТ 6323-79
АППВ	То же с алюминиевыми жилами	То же	ГОСТ 6323-79
АВТ	Провод с алюминиевыми жилами, с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, с несущим тросом	Прокладка наружная (для ввода в жилые дома и хозяйственные постройки) в сетях на напряжение 380 В в I и II районах гололедности	ГОСТ 14175-78
АВТУ	То же с усиленным несущим тросом	То же в III и IV районах гололедности	ГОСТ 14175-78
АВТВ	Провод с алюминиевыми жилами, с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, с несущим тросом, для внутренней прокладки	Прокладка внутри помещений (в том числе животноводческих) в сетях на напряжение 380 В	ГОСТ 14175-78
АВТВУ	То же с усиленным несущим тросом	То же, но где требуется повышенная механическая прочность	ГОСТ 14175-78

Провода силовые гибкие (нагревостойкие)

ПРКА	Провод термостойкий, с медной жилой в изоляционно-защитной оболочке из кремнийорганической резины повышенной твердости, одножильный	При фиксированном монтаже внутри осветительной аппаратуры	ТУ 16.505.317-76
ПВБЛ	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией на основе бутылкаучука, в оплетке на лавсановой нити	Для вывода электродвигателей	ГОСТ 16036-79
РКГМ	Провод с медной жилой, с изоляцией из кремнийорганической резины, в оплетке из стекловолокна, пропитанной эмалью или термостойким лаком	Для вывода электродвигателей	ГОСТ 16036-79
ПАЛ	Провод с медной жилой, с асбестопленочной изоляцией, лакированный	Для вывода электродвигателей, для работы в условиях межприборного монтажа	ТУ 16-505.656-74
ПАЛО	То же облегченный	То же	ТУ 16-505.656-74

Таблица 18.93. Номинальные сечения жил, их число и расчетные диаметры силовых проводов с резиновой изоляцией на напряжение 660 В частотой 50 Гц или постоянное напряжение 1000 В

Обозначение марки	Число жил	Номинальное сечение жилы, мм ²	Расчетный наружный диаметр, мм
ПРТО	1	0,75—120	3,7—19,3
	2; 3	1—120	7,5—38,9
			7,9—41,6
	4; 7	1,5—10	9,6—15,8
			11,6—19,9
АПРТО	10	1,5; 2,5	15,0; 16,5
	14	1,5; 2,5	16,4; 18,6
	1; 2; 3	2,5—120	3,7—19,3
			7,5—38,9
			7,9—41,6
ПРН, ПРГН, АПРН	7	2,5—10	11,6—19,9
	10	2,5	16,5
	14		18,5
	1	1,5—120	3,8—18,6
			3,9—21,4
ПРИ, АПРИ, ПРГИ, АППР	1	2,5—120	4,2—18,7
	1	0,75—120	3,4—18,6
	1	2,5—120	4,2—18,7
	1	0,75—120	3,5—21,4
	2; 4	2,5—10	5×14,0—9,2×19,4
	3	2,5	12,1—17,3
			5,0—19,0

Провода с резиновой изоляцией допускают длительный нагрев жил до 65 °С, с теплостойкой резиной на основе бутылкаучука—до 85 °С, с кремнийорганической резиновой изоляцией—до 180 °С, с пластмассовой изоляцией—до 70 °С. Монтаж проводов допустим при температуре не ниже 15 °С.

Таблица 18.94. Номинальные сечения жил, их число и наружные диаметры проводов ПРД, ПРВД, АРТ

Марка	Число жил	Номинальное сечение, мм ²	Наружный диаметр, мм
ПРД, ПРВД, АРТ	2	0,75—6	6,0—10,2
	2	1,0—6	6,8—10,0
	2	2,5—4	9,0—10,1
	3	4; 6	11,3—12,5
	4	4—35	12,7—31,3

Таблица 18.95. Номинальные сечения основных жил, их число, наружные диаметры и масса проводов ПРП, ПРРП, АПРФ, ПРФ, ПРФл

Марка	Число основных жил	Номинальное сечение, мм ²	Наружный диаметр, мм	Масса, кг/км
ПРП	1, 2, 3	1,0—95	5,8—44,0	71—4162,0
	4—30	1,0—10	10,5—31,0	
ПРРП	1, 2, 3	1,0—95	7,6—48,4	106,0—5078,0
	4—30	1,0—10	12,8—36,0	
ПАРФ, ПРФ	1, 2, 3	2,5—4	5,0—11,4	43,0—153,0
	1, 2, 3	1,0—4	4,3—11,4	40,0—241,0
ПРФл	1, 2, 3	1,0—4	4,2—11,3	64,6—294,0

Соединительные шнуры предназначены для присоединения различных бытовых электрических машин, приборов, радиоаппаратуры, теле-

Таблица 18.96. Наружные диаметры и массы одножильных проводов с пластмассовой изоляцией

Марка	Сечение, мм ²	Диаметр, мм		Масса, кг/км	
		380/660 В	660/1100 В	380/660 В	660/1100 В
АПВ	2,0—120	3,4—16,9	3,4—17,7	16—423	16—456
ПВ1	0,5—95	2,0—15,6	2,4—15,8	7,95—957	9,8—979
ПВ2	2,0—95	3,2—15,66	3,8—16,1	26—938	30,5—953
ПВ3	0,5—95	2,1—17,97	2,50—18,4	8,6—976	10,7—993
ПВ4	0,5—10	2,14—7,28	2,54—7,68	8,73—122,3	10,80—12,7

Таблица 18.97. Наружные диаметры и массы нагревостойких проводов на напряжение 380 В

Марка	Сечение, мм ²	Наружный диаметр, мм	Масса, кг/км
ПРКА	0,5—2,5	2,1—3,7 2,5—4,1*	8,7—34,7 10,8—38,4*
ПВБЛ	2,5—50,0	4,5—15,1	18—403*
РКГМ	0,75—120,0	3,2—20,8	24—1294*
ПАЛ	0,75—50,0	4,4—15,0	27,8—592,2
ПАЛО	0,75—50,0	3,8—13,5	20,3—539,1

* На напряжение 660 В.

Таблица 18.100. Типы, марки, наименования и области применения бытовых соединительных проводов и шнуров (ГОСТ 7399-80)

Тип	Марка	Сечение, мм ²	Наименование	Преимущественные области применения
Плоский оболочки без	ШПП	0,20	Шнур с ПЭ изоляцией, с параллельными жилами, без разделительного основания, слабостойкий на напряжение до 100 В	Для абонентских громкоговорителей, если шнур редко подвергается механическим деформациям
	ШВП-1	0,35—0,75	Шнур с ПВХ изоляцией, с параллельными жилами, без разделительного основания, на напряжение до 380 В	Для радиоприемников, телевизоров, паяльников, других подобных приборов, если шнур подвергается механическим деформациям
	ШВП-2	0,35—0,75	То же гибкий	Для настольных, настенных и напольных светильников, вентиляторов, магнитофонов, удлинителей-разветвителей и других подобных приборов, если шнур часто подвергается легким механическим деформациям
	ШВП-3	0,75	Шнур с ПВХ изоляцией, с параллельными жилами, с разделительным основанием, на напряжение до 380 В	Для бытовых холодильников и других подобных приборов, если шнур редко подвергается механическим деформациям
	ШВП-4	0,75	То же гибкий	То же
Круглый оболочки без	ШВПТ	0,35	Шнур с ПВХ изоляцией, с параллельными жилами, теплостойкий на напряжение до 48 В	Для переносных ламп автомобилей
Легкий с оболочкой	ШВВП	0,35—1,0	Шнур гибкий с ПВХ изоляцией в ПВХ оболочке, плоский на напряжение до 380 В	То же, что ШВП-2
	ШВЛ	0,5—0,75	Шнур гибкий со скрученными жилами, с ПВХ изоляцией в ПВХ оболочке, на напряжение до 380 В	Для бытовых полотеров, пылесосов, напольных подобных машин и приборов, если шнур подвергается действию влаги в условиях легких механических воздействий

Таблица 18.98. Наружные размеры и массы двух- и трехжильных плоских проводов с пластмассовой изоляцией на напряжение 380 В

Марка	Число жил и сечение	A×B*, мм	Масса, кг/км
ППВ	(2×0,75)—(3×4)	(2,2×9,4)—(3,8×16,4)	25—173
АППВ	(2×2,0)—(3×6)	(3,4×11,7)—(4,4×18,2)	34—91

Таблица 18.99. Номинальное сечение, число жил и наружный диаметр проводов марок АВТ, АВТУ, АВТВ, АВТВУ

Марка	Число жил	Номинальное сечение, мм ²	Наружный диаметр, мм
АВТ	2, 3, 4	2,5—16	2,5—21,4
АВТУ	2, 3, 4	2,5—16	2,5—21,4
АВТВ	2, 3, 4	2,5—16	7—19,2
АВТВУ	2, 3, 4	2,5—16	7—19,2

визоров и других подвижных и неподвижных установок к электрическим сетям переменным напряжением до 660 В (табл. 18.100 и 18.101). Длительно допустимая температура нагрева токопроводящих жил: 65 °С — шнуров с резиновой изоляцией, 70 °С — шнуров с изоляцией из поливинилхлоридного пластика.

Продолжение табл. 18.100

Тип	Марка	Сечение, мм ²	Наименование	Преимущественные области применения
Обычный с оболочкой	ШРО	0,35—1,0	Шнур гибкий со скрученными жилами, с резиновой изоляцией, в оплетке из хлопчатобумажной или синтетической нити, на напряжение до 220 В	Для утюгов домашнего обихода, кофеварок, чайников, грелок и других подобных приборов, если шнур часто подвергается легким механическим деформациям
	ШРС	0,5—0,75	Шнур гибкий со скрученными жилами, с резиновой изоляцией, в резиновой оболочке, на напряжение до 380 В	Для бытовых электроплиток, полотеров, пылесосов, напольных отопительных приборов, утюгов, если шнур подвергается действию влаги в условиях легких механических воздействий
	ШТР	0,5—1,5	Шнур повышенной гибкости, термостойкий, со скрученными жилами, с изоляцией и в оболочке из кремнийорганической резины, на напряжение до 220 В	Для утюгов домашнего обихода и промышленного применения, электроплиток и других подобных приборов, если шнур подвергается легким механическим деформациям и нагреву
	ШПС	0,5—0,75	Шнур со скрученными жилами, с ПВХ изоляцией, в ПВХ оболочке, подвесной грузонесущий, на напряжение до 220 В	Для светильников, подвешиваемых на электрическом шнуре
	ПРС	0,5—4,0	Провод гибкий со скрученными жилами, с резиновой изоляцией и оболочкой, на напряжение до 380/660 В	Для полотеров, пылесосов, стиральных машин, электрорадиаторов, удлинительных, бойлеров и других подобных машин и приборов, если провод подвергается истиранию и действию влаги в условиях средних механических воздействий
	ПВС	0,5—2,5	Провод гибкий со скрученными жилами, с ПВХ изоляцией, в ПВХ оболочке, на напряжение до 380/660 В	То же

Таблица 18.101. Сортамент соединительных шнуров для бытовых электрических машин и приборов

Марка	Число жил в шнуре при сечении, мм ²							
	0,20	0,35	0,50	0,75	1,0	1,5	2,5	4,0
ШПП	2	—	—	—	—	—	—	—
ШВР-1	—	2	2	2	—	—	—	—
ШВП-2	—	2	2	2	—	—	—	—
ШВП-2	—	—	—	2, 3	—	—	—	—
ШВП-4	—	—	—	2	—	—	—	—
ШВПТ	—	2	—	—	—	—	—	—
ШВВП	—	2	2, 3	2, 3	2	—	—	—
ШВЛ	—	—	2, 3	2, 3	—	—	—	—
ШРО	—	2	2, 3	2, 3	2, 3	—	—	—
ШРС	—	—	2, 3	2, 3, 4	—	—	—	—
ШТР	—	—	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	—	—
ШПС	—	—	2, 3	2, 3	—	—	—	—
ПРС	—	—	2, 3	2, 3, 4	2, 3, 4	2, 3, 4	2, 3, 4	—
ПВС	—	—	2, 3	2, 3, 4	2, 3, 4	2, 3, 4	2, 3, 4	2, 3, 4

18.15. РАЗЛИЧНЫЕ КАБЕЛИ И ПРОВОДА С ПЛАСТМАССОВОЙ И РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Номенклатура выпускаемых кабелей и проводов с резиновой и пластмассовой изоляцией очень широка, поэтому ниже приводятся сведения только о некоторых важнейших типах кабельной продукции, используемой для передачи и распределения электроэнергии.

Наиболее широкую группу кабелей с резиновой изоляцией и в резиновой оболочке составляют медные гибкие кабели общего применения, предназначенные для присоединения пе-

редвижных механизмов к электрическим сетям на номинальное переменное напряжение 660 В частоты до 400 Гц или постоянное напряжение до 1000 В. В соответствии с ГОСТ 13497-77 выпускаются кабели семи марок, преимущественная область применения которых приведена в табл. 18.102. Кабели выпускаются с числом основных жил 1—3, номинальное сечение которых может составлять от 0,75 до 150 мм². Некоторые кабели имеют заземляющую жилу и 1—2 вспомогательные жилы. Сечения заземляющих жил в зависимости от сечения основной жилы составляют 0,75—150 мм², сечение вспомогательных жил — 0,75—10 мм². Кабели марок КРПТ и КРПТН имеют жилу, по гибкости

Таблица 18.102. Марки гибких кабелей на напряжение 660 В и их преимущественные области применения

Марка кабеля	Наименование элементов кабеля	Преимущественная область применения
КРПГ	С медными жилами с резиновой изоляцией в резиновой оболочке	При изгибах с радиусом не менее восьми диаметров кабеля; при температуре окружающей среды от минус 40 до плюс 50 °С
КРПТН	То же, но в резиновой маслостойкой оболочке, не распространяющей горение	При изгибах с радиусом не менее восьми диаметров кабеля; при возможности попадания на оболочку дезинфицирующих и агрессивных веществ, употребляемых в сельском хозяйстве, а также масла; при температуре окружающей среды от —30 до +50 °С
КРПГ	С медными жилами повышенной гибкости с резиновой изоляцией в резиновой оболочке	При изгибах с радиусом не менее пяти диаметров кабеля; при температуре окружающей среды от —50 до +50 °С
КРПГН	То же, но в резиновой маслостойкой оболочке, не распространяющей горение	То же, но при возможности попадания на оболочку дезинфицирующих и агрессивных веществ, употребляемых в сельском хозяйстве, а также масла
КРПС	С медными жилами повышенной гибкости с резиновой изоляцией с профилированным сердечником в резиновой оболочке	При изгибах с радиусом не менее пяти диаметров кабеля; при возможности воздействия на кабель ударных и раздавливающих нагрузок, при температуре окружающей среды от —50 до +50 °С
КРПСН	То же, но в резиновой маслостойкой оболочке, не распространяющей горение	При изгибах с радиусом не менее пяти диаметров кабеля; при возможности попадания на оболочку дезинфицирующих и агрессивных веществ, употребляемых в сельском хозяйстве, а также масла; при температуре окружающей среды от —30 до +50 °С
КРШК	С медными жилами повышенной гибкости с резиновой изоляцией с заполнениями, в резиновой оболочке	При изгибах с радиусом не менее 10 диаметров кабеля; при температуре окружающей среды от —50 до +50 °С

уступающую жилам кабелей остальных марок, перечисленных в табл. 18.102. Так, если жила кабелей марок КРПГ и КРПТН сечением 70 мм² состоит из 189 проволок диаметром 0,68 мм, то для кабелей марок КРПГ, КРПГН, КРПС, КРПСН, КРШК это же сечение выполняется 266 проволоками диаметром 0,58 мм каждая. Основные жилы кабелей должны иметь расцветку, отличающую их друг от друга, или другие способы различия. Жила заземления (кроме жилы заземления кабелей марки КРШК) должна быть черного или желто-зеленого цвета. Средний срок службы кабелей находится в пределах от 2 до 4 лет, причем в течение этого срока службы кабели должны выдерживать от 4000 до 15 000 знакопеременных изгибов с диаметром не менее 200—400 мм (в зависимости от марок кабелей). Длительно допустимая температура токопроводящих жил кабелей должна быть не более 65 °С. Растягивающие нагрузки на кабель должны быть не более 19,6 Н на 1 мм² суммарного сечения всех жил.

В соответствии с ГОСТ 6731-77 выпускаются гибкие кабели с медными жилами с резиновой изоляцией, предназначенные для соединения при дуговой сварке электрододержателей, автоматических или полуавтоматических сварочных установок с источником номинального переменного напряжения до 220 В частотой 50 Гц или постоянного напряжения. Марки кабелей — КОГ1 и КОГ2. Их конструкции приведены в табл. 18.103.

Кабели должны быть стойкими к воздействию знакопеременных изгибов на угол 180° при радиусе изгиба 50 мм и растягивающей нагрузке 98 Н. В зависимости от сечения жил регламентированное число циклов знакопеременных изгибов кабелей находится в пределах 400—12 000. Максимально допустимая температура

Таблица 18.103. Конструкции сварочных кабелей марок КОГ1 и КОГ2

Марка кабеля	Число жил		Номинальное сечение жилы, мм ²	
	основных	вспомогательных	основной	вспомогательной
КОГ1	1	—	16—150	—
КОГ2	1	—	16—70	—
	1	2,4	25—150	0,75

тура окружающей среды при эксплуатации кабелей 50 °С, минимально допустимая температура — 50 °С. Кабели могут изготавливаться в тропическом исполнении; в этом случае минимально допустимая температура повышается до —30 °С. Если кабель изготавливается для эксплуатации в районах с холодным климатом, то его холодостойкость составляет —60 °С. Срок службы кабелей находится в пределах от 1,5 до 4,0 лет.

При эксплуатации сварочных кабелей следует учитывать, что длительно допустимая температура токопроводящих жил должна быть не более 75 °С. При температуре окружающей среды 25 °С токовые нагрузки должны быть не более указанных:

Номинальное сечение основной жилы, мм ²	16	25	35	50	70	95	120	150
Токовая нагрузка, А . . .	195	248	301	372	454	533	608	687

Минимально допустимый радиус изгиба кабелей должен быть не менее трех наружных диаметров кабеля, растягивающие нагрузки — не более 19,6 Н на 1 мм² номинального сечения.

Резиновая изоляция и оболочка продолжают сохранять свое доминирующее положение в ряде кабелей специального назначения, среди которых можно выделить следующее:

1) Кабели и провода для горных разработок и землеройных работ. Эти кабели предназначены для присоединения различных передвижных машин и механизмов, например экскаваторов, шахтных комбайнов, шахтного бурильного инструмента и т. д., к электрическим сетям. К таким кабелям относятся гибкие силовые экскаваторные кабели на напряжения 6 и 10 кВ, гибкие шахтные кабели, в том числе с экранированными жилами, гибкие экранированные шахтные кабели для бурильного инструмента.

2) Высоковольтные рентгеновские кабели. Эти кабели предназначены для подвода тока накала и высокого напряжения к рентгеновским трубкам. Кабели рассчитаны на выпрямленное пульсирующее напряжение до 150 кВ или переменное напряжение 55 кВ.

3) Кабели для радиоустановок. Такие кабели предназначены для монтажа радиоустановок на переменные напряжения 380, 660 и 3000 В частотой до 400 Гц или постоянные 700, 1000 и 6000 В. Если требуется защита от радиопомех, то кабели выполняются экранированными.

4) Кабели аэродромные. Рассчитаны на переменные напряжения 250, 660, 3000 и 6000 В. Низковольтные кабели на напряжение 250 В предназначены для подключения аэродромных огней или светосигнальных знаков ко вторичной обмотке трансформаторов, а также кабельных вводов трансформаторов. Низковольтные кабели на напряжение 660 В соединяют аэродромные огни, освещающие площадки посадок самолетов. Высоковольтные кабели на напряжения 3 и 6 кВ соединяют в общую цепь первичные обмотки трансформаторов, питающих аэродромные огни, и используются для присоединения к регуляторам яркости. Кроме того, кабели на напряжение 3 кВ соединяют высоковольтные обмотки трансформаторов для аэро-светосигналов.

Большую группу кабельной продукции составляют кабели и провода для подвижного состава, которые выпускаются как с резиновой, так и с пластмассовой изоляцией. Эти кабели

Таблица 18.104. Основные марки проводов с резиновой изоляцией для электрифицированного транспорта

Марка провода	Наименование
ПС	Одножильный, в оплетке, пропитанной противогнилостным составом, на номинальные постоянные напряжения 1000, 3000 и 4000 В
ПСШ	Одножильный, в резиновом шланге, на номинальные постоянные напряжения 3000 и 4000 В
ПМУ	Одножильный, с усиленной изоляцией, в двух оплетках, пропитанных противогнилостным составом, на номинальное постоянное напряжение 4000 В
ПСЭО	16-жильный, в общей оплетке, пропитанной противогнилостным составом, на номинальные постоянные напряжения 1000 и 2000 В
ПСЭШ	16-жильный, в резиновом шланге, на номинальные постоянные напряжения 1000 и 2000 В

и провода предназначены для внутренних и наружных соединений электрооборудования всех видов подвижного состава рельсового транспорта и троллейбусов.

В соответствии с ТУ 16-505.657-74 выпускаются провода, перечисленные в табл. 18.104.

Эти провода выпускаются в широком диапазоне сечений — от 1 до 300 мм² (естественно, за исключением 16-жильных). Изолированные жилы проводов марок ПС, ПМУ, ПСЭО, ПСЭШ и готовые провода марки ПСШ должны быть испытаны после 6 ч пребывания в воде двойным рабочим напряжением частоты 50 Гц в течение 5 мин, т. е. жилы проводов на напряжение 1000 В напряжением 2000 В и т. д. Срок службы проводов, предназначенных для фиксированного монтажа и монтажа с ограниченной подвижностью, — 12 лет.

По ГОСТ 6598-73 и ТУ 16-705.195-81 выпускаются провода и кабели для подвижного состава с резиновой изоляцией и резиновой или поливинилхлоридной оболочкой, марки которых и преимущественная область применения приведены в табл. 18.105.

Эти провода и кабели рассчитаны для использования при напряжении от 660 до 4000 В

Таблица 18.105. Марки и преимущественная область применения проводов и кабелей для подвижного состава

Марка провода или кабеля	Наименование	Преимущественная область применения
ППСВ	Провод с поливинилхлоридной изоляцией	Для фиксированного монтажа и при ограниченных перемещениях при воздействии смазочных масел и дизельного топлива
ППСРМО	Провод с резиновой изоляцией в резиновой облегченной оболочке	То же, но при отсутствии воздействия смазочных масел и дизельного топлива
ППСРМ	Провод с резиновой изоляцией в резиновой оболочке	Для присоединения к подвижным токоприемникам, монтажа при ограниченных перемещениях и для фиксированного монтажа при отсутствии воздействия смазочных масел и дизельного топлива
ППСРН	Провод с резиновой изоляцией в маслостойкой, не распространяющей горение резиновой оболочке	То же, но при воздействии смазочных масел и дизельного топлива
ППСРВМ	Провод с резиновой изоляцией в поливинилхлоридной оболочке	То же
КПСРВМ	Кабель с резиновой изоляцией в поливинилхлоридной оболочке	» »
КПСРМ	Кабель с резиновой изоляцией в резиновой оболочке	То же, но при отсутствии воздействия смазочных масел и дизельного топлива

Таблица 18.106. Диапазон номинальных сечений, число жил проводов и кабелей для подвижного состава

Марка провода или кабеля	Число жил	Диапазон номинальных сечений жил, мм ²
ППСВ	1, 2	0,5—6,0
ППСРМО	1	1,0—10,0
ППСРМ, ППСРН, ППСРВМ	1	1,0—300,0
КПСРВМ, КПСРМ	2, 3, 4, 7, 12, 16, 19, 24, 37	1,5 и 2,5

частотой до 400 Гц и постоянном напряжении от 1000 до 6000 В.

Диапазон номинальных сечений и число жил проводов и кабелей для подвижного состава приведены в табл. 18.106.

Провода и кабели должны выдержать комплекс электрических, механических и климатических испытаний. Срок службы проводов и кабелей, предназначенных для присоединения к подвижным токоприемникам, — 6 лет, остальных проводов и кабелей — 12 лет.

Для эксплуатации в лифтовых установках при номинальном постоянном или переменном напряжении до 380 В используются многожильные гибкие подвесные кабели со стальным грузонесущим тросом, с медными жилами, с полиэтиленовой изоляцией, в резиновой или поливинилхлоридной оболочке, выпускаемые по ГОСТ 16092-78.

Лифтовые кабели выпускаются экранированными и неэкранированными. Их марки, конструктивные элементы и преимущественные области применения указаны в табл. 18.107.

Число жил лифтовых кабелей — от 6 до 24. Изолированная жила должна выдерживать при перематке через электроды переменное напряжение 6000 В, а кабель должен выдерживать при приемке и поставке действие переменного напряжения 2000 В в течение 5 мин, в периоды эксплуатации и хранения — переменного напряжения 1000 В. Кабели в оболочке

Таблица 18.107. Марки, конструктивные элементы и преимущественные области применения лифтовых кабелей

Марки кабелей	Конструктивные элементы	Преимущественная область применения
КПРЛ	Кабель с медными жилами с полиэтиленовой изоляцией со стальным грузонесущим тросом в оболочке из резины	Для лифтов наружной установки
КПРЛЭ	То же в общем экране	То же, но в условиях, требующих экранирования
КПВЛ	Кабель с медными жилами с полиэтиленовой изоляцией со стальным грузонесущим тросом в оболочке из поливинилхлоридного пластика	Для лифтов, устанавливаемых внутри зданий и сооружений
КПВЛЭ	То же в общем экране	То же, но в условиях, требующих экранирования

ке из пластика предназначены для эксплуатации при температуре окружающей среды от —20 до +70 °С, в оболочке из резины — от —50 до +50 °С. Растягивающее усилие, прилагаемое к грузонесущему тросу, включая массу подвешенного кабеля, не должно превышать 1373 Н. При этом минимальный радиус изгиба кабелей должен находиться в пределах от 150 до 400 мм. Средний ресурс кабелей при минимальном радиусе изгиба должен быть равен 1 млн. циклов спуск — подъем, средний срок службы — 8 лет.

Ряд конструкций проводов и кабелей имеет плоское или ленточное исполнение. По своему назначению эти кабели относятся к члчам монтажных кабелей, кабелей управления, телевизионных проводов и г. п. Эти кабельные изделия имеют полиэтиленовую или поливинилхлоридную изоляцию, накладываемую методом экструзии, или же пленочную изоляцию на основе дублированных пленок типов полиэтилен-лаванс или полиимид — фторопласт, накладываемую методом склейки при нагревании и размягчении.

В частности, в системах цветного телевидения используются ленточные телевизионные провода марки ПЛВВ, имеющие три или четыре медные луженые жилы с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластика. Провода предназначены для работы при постоянном напряжении 380 В и переменном 250 В переменного тока частотой до 5,5 МГц. Трехжильные провода имеют ширину 19,5 мм, толщину 1,65 мм. У четырехжильных проводов ширина увеличивается до 27,5 мм. Провода должны выдерживать не менее 100 перегибов на угол ±90°. Провода могут быть смонтированы в аппаратуру с использованием различных штепсельных соединителей.

18.16. МОНТАЖНЫЕ КАБЕЛИ И ПРОВОДА

Монтажные кабели и провода применяются для осуществления электрических соединений в приборах, аппаратах и других электрических устройствах, радиотехнических и иных схемах. Большое количество марок этих проводов связано с разнообразием условий их применения. В целом их можно разделить на провода обычной и повышенной нагревостойкости. За повышенную температуру принимают температуру наиболее нагретой точки в кабеле. Для проводов обычной нагревостойкости ниже приведены подробный ассортимент и показатели. Провода повышенной нагревостойкости изготавливаются по отдельным техническим условиям, и для них будут приведены только маркировка и основные показатели. Более подробные сведения о них можно найти в рекомендуемой литературе.

Монтажные кабели, ГОСТ 10348-80, с медными жилами (проволами лужеными) и пластмассовой изоляцией, в поливинилхлоридной оболочке предназначены для фиксированного монтажа при напряжении 500 В частоты до 400 Гц или постоянном 750 В. Кабели изготавливаются марок МКШ — с изоляцией из поливинилхлоридного пластика; МКЭШ — то же, экранированные оплеткой из медной проволоки.

Номенклатура этих кабелей приведена в табл. 18.108. Электрическое сопротивление изоляции при 20 °С — не менее 10 МОм·км.

Таблица 18.108

Число жил и номинальное сечение, мм ²	Наружный диаметр кабеля, мм, не более		Число жил и номинальное сечение, мм ²	Наружный диаметр кабеля, мм, не более	
	МКШ	МКЭШ		МКШ	МКЭШ
2×0,35	6,7	7,5	7×0,5	9,2	10,0
3×0,35	6,9	7,7	10×0,5	12,2	13,0
5×0,35	8,2	9,0	14×0,5	13,1	13,9
7×0,35	8,8	9,9	2×0,75	7,5	8,3
10×0,35	11,7	12,4	3×0,75	7,7	8,5
14×0,35	12,4	13,2	5×0,75	9,2	10,0
2×0,5	7,0	7,8	7×0,75	10,0	10,8
3×0,5	7,2	8,0	10×0,75	13,2	14,0
5×0,5	8,5	9,5	14×0,75	14,2	15,0

Кабели стойки к следующим воздействиям: вибрационным нагрузкам до 2000 м/с² при 1—2000 Гц;

многократным ударным нагрузкам с ускорением до 1500 м/с² и длительностью до 3 мс; температуре от —50 до +70 °С;

относительной влажности 98 % при 40 °С.

Срок службы кабелей 12 лет.

Монтажные кабели, ГОСТ 17301-79, малогабаритные с медными жилами (проводами луженые) с пластмассовой изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластика предназначены для фиксированного монтажа, кабели с полиэтиленовой изоляцией могут работать при частотах до 200 кГц, кабели с изоляцией из поливинилхлоридного пластика — до 400 Гц.

Первые две буквы марок КМ обозначают «кабель монтажный». Третья буква П или В обозначает полиэтиленовую или поливинилхлоридную изоляцию. Четвертая буква В — поливинилхлоридную оболочку. Пятая буква П — оплетку из оцинкованных стальных проволок поверх оболочки. Вставка буквы Э обозначает

экранирование жил оплеткой из медных проволок по соответствующему элементу конструкции. Примеры: КМВВ — кабель монтажный с поливинилхлоридной изоляцией, поливинилхлоридной оболочкой; КМПВ — то же с полиэтиленовой изоляцией; КМПЭВ — то же с экраном по изоляции; КМПЭВП — то же с оплеткой из стальных проволок по оболочке.

Ассортимент выпускаемых кабелей приведен в табл. 18.109.

Электрическое сопротивление изоляции жил при температуре 20 °С — не менее 1000 МОм·км для полиэтиленовой и 5 МОм·км для поливинилхлоридной изоляции.

Кабели стойки к следующим воздействиям: температуре от —40 и —50 до +65 и 70 °С соответственно для поливинилхлоридной и полиэтиленовой изоляции;

относительной влажности 90 % при 40 °С;

наличию паров и брызг масла и бензина;

вибрационными нагрузками частотой до 30 Гц и амплитудой до 0,3 мм;

ударным нагрузкам с ускорением 70 м/с² при длительности импульса 80 мс.

Срок службы кабелей — 12 лет внутри помещений.

Монтажные провода, ГОСТ 17515-72, с медными лужеными жилами с изоляцией из поливинилхлоридного пластика или полиэтилена в капроновой оболочке или без оболочки предназначены для работы при напряжениях 500 и 1000 В частоты до 5000 Гц или постоянном 700 и 1400 В соответственно в цепях электроустройств общепромышленного применения. Провода в капроновой оболочке предназначены для применения в условиях повышенных механических воздействий.

Вторая буква маркировки означает: В — поливинилхлоридная изоляция, П — полиэтиленовая изоляция. Последующие буквы означают: К — капроновая оболочка; Э — экран в виде оплетки из медной проволоки. Пример

Таблица 18.109. Монтажные кабели по ГОСТ 17301-79

Марка кабеля	Номинальное сечение жилы, мм ²	Число жил	Номинальное напряжение, В
КМПВ	0,35—1,5	1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37, 52	500
	2,5	1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37	500
	0,5—2,5	1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37	1000
КМПВЭ	0,85—1,5	2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37, 52	500
КМПВЭВ	2,5	2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37	500
	0,5—2,5	2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37	1000
КМПЭВ	0,35—1,5	2, 3, 4, 7, 12, 14, 19, 24, 27, 37, 52	500
КМПЭВЭ, КМПЭВЭВ	0,35—0,5	12/8Э*, 17/11*, 27/13Э*, 39/24/*, 50/22Э*	500
	0,75	16×2Э**, 19×2Э**, 37×2Э**	500
	1,5	4, 7, 12, 19, 27, 37, 52	1000
КМВВЭ	0,75—1,5	1, 2, 3, 4, 7, 10, 12	500
	1,5—2,5	1, 2, 3	

* Числитель указывает общее число жил, знаменатель — число экранированных жил от общего их количества.

** Кабель с попарно экранированными жилами.

Таблица 18.110. Наружные диаметры монтажных проводов на напряжение 500 В, мм

Сечение жилы, мм²	НВ	НП	НВЭ	НПЭ	НВЭ	НПЭ	НВК	НПК	НВКЭ	НПКЭ	НВКЭ	НПКЭ
			Одножильные		Число жил				Одножильные		Число жил	
					2	3					2	3
0,08	1,2	1,2	—	—	—	—	1,5	1,5	—	—	—	—
0,12	1,3	1,3	1,8	1,8	3,2	3,4	1,6	1,6	2,1	2,1	3,8	4,1
0,20	1,5	1,5	2,0	2,0	3,6	3,8	1,8	1,8	2,3	2,3	4,2	4,5
0,35	1,6	1,6	2,2	2,2	3,8	4,1	1,9	1,9	2,5	2,5	4,4	4,7
0,50	1,8	1,8	2,3	2,3	4,2	4,5	2,1	2,1	2,7	2,7	4,8	5,1
0,75	2,1	2,1	2,7	2,7	4,8	5,1	2,3	2,3	2,9	2,9	5,2	5,6
1,0	2,2	2,2	2,8	2,8	5,0	5,3	2,4	2,4	3,0	3,0	5,4	5,8
1,5	—	2,5	—	3,1	—	—	—	2,8	—	3,4	—	—
2,5	—	3,2	—	3,8	—	—	—	3,4	—	4,0	—	—

Таблица 18.111. Наружные диаметры проводов на напряжение 1000 В, мм

Сечение жилы, мм ²	НВ	НВЭ с числом жил			НВК	НВКЭ с числом жил		
		1	2	3		1	2	3
0,08	1,4	—	—	—	1,7	—	—	—
0,12	1,5	2,0	3,6	3,8	1,8	2,3	4,2	4,5
0,20	2,7	2,2	4,0	4,3	1,9	2,4	4,4	4,7
0,35	1,8	2,4	4,2	4,5	2,1	2,7	4,8	5,1
0,50	2,0	2,5	4,6	4,9	2,2	2,8	5,0	5,3
0,75	2,3	2,9	5,2	5,6	2,5	3,1	5,6	6,0
1,0	2,4	3,0	5,4	5,8	2,6	3,2	5,8	6,2

маркировки: МВКЭ — провод монтажный низковольтный с изоляцией из поливинилхлоридного пластика в капроновой оболочке, экранированный.

Ассортимент и наружный диаметр провода приведены в табл. 18.110 и 18.111. Электрическое сопротивление изоляции — не менее 10^3 и 10^5 Ом·м для проводов с поливинилхлоридной и полиэтиленовой изоляцией в нормальных условиях, при максимальной рабочей температуре — соответственно 10^2 и 10^4 Ом·м.

Провода стойки к следующим воздействиям:

температуре от -50 до $+70$ °С для проводов с поливинилхлоридной изоляцией, от -60 до $+85$ °С для проводов с полиэтиленовой изоляцией в капроновой оболочке;

вибрационным нагрузкам с ускорением до 100 м/с² с частотой до 600 Гц и многократным ударам с ускорением до 350 м/с²;

относительной влажности 98% при 40 °С; воздействию бензина, минерального масла и плесневых грибов.

Срок службы проводов 10 лет; ресурс работы при максимальных рабочих температурах 1000 ч.

Монтажные провода, ГОСТ 10349-75, одножильные с медными лужеными и нелужеными проволоками, с волокнистой изоляцией предназначены преимущественно для фиксированного монтажа.

Марки проводов и их конструкции приведены в табл. 18.112, а их ассортимент и наружный диаметр — в табл. 18.113.

Провода предназначены для эксплуатации при температуре от -60 до $+105$ °С. Провода могут иметь 22 расцветки.

Таблица 18.112. Одножильные монтажные провода

Обозначение марок	Наименование проводов	Номинальное переменное напряжение, В
МШДЛ	Однопроволочный с двойной обмоткой из капроновой нити, лакированный	220
МЭШДЛ	То же, но жила эмалированная	220
МГШ	Многopроволочный в оплетке из капроновой нити	24
МГШД	Многopроволочный с двойной обмоткой из капроновой нити	60
МГШДО	Многopроволочный с двойной обмоткой и оплеткой из капроновой нити	127
МГШДОП	Многopроволочный с двойной обмоткой и подклеенной оплеткой из капроновой нити	127
МГШДЛ	Многopроволочный с двойной обмоткой из капроновой нити, лакированный	220
МГСЛ	Многopроволочный с двойной обмоткой в оплетке из стекловолокна, лакированный	127
МГСЛЭ	То же экранированный	127

Примечание. Для изоляции лакированных проводов марок МШДЛ, МЭШДЛ, МГШДЛ допускается применение лавсановой нити.

Таблица 18.113. Наружные диаметры монтажных проводов, мм, не более

Сечение жилы, мм ²	МШДЛ	МЭШДЛ	МГШ	МГШДОП	МГШДО	МГШДЛ	МГСЛ	МГСЛЭ	МГШД
0,05	—	—	0,6	1,0	1,0	0,8	—	—	0,7
0,08	—	—	0,7	1,1	1,1	0,9	—	—	0,8
0,12	1,0	1,0	0,8	1,2	1,2	1,0	—	—	0,9
0,20	1,1	1,1	—	1,3	1,3	1,3	1,6	2,2	1,0
0,35	1,3	1,3	—	1,5	1,5	1,4	1,8	2,4	1,2
0,5	1,4	1,4	—	1,6	1,6	1,5	1,9	2,5	1,3
0,75	1,6	1,6	—	1,8	1,8	—	2,1	2,7	—
1,0	—	—	—	1,9	1,9	2,0	2,3	2,9	—
1,5	—	—	—	2,3	2,3	2,3	2,6	3,2	—
2,5	—	—	—	2,7	2,7	—	—	—	—

Электрическое сопротивление изоляции проводов при температуре 20 °С не меньше указанного в табл. 18.114 (для провода МГШ не нормируется). Эти провода не рекомендуют-

Таблица 18.114

Марка проводов	Относительная влажность воздуха	Электрическое сопротивление, МОм·м
МЭШДЛ	95±3	1000
МШДЛ, МГШДЛ	95±3	300
МГСЛ, МГСЛЭ	80±3	10
МГШД, МГШДО, МГШДОП	65±3	100

Таблица 18.115. Наружные диаметры монтажных проводов, мм, не более

Число жил и их сечение, мм²	Наружные диаметры проводов					
	МШВ, МШП	МГШВ, МГШП	МГШВЭ	МГШПЭ	МГШВЭВ	МППС
0,08	1,0	—	—	—	—	—
0,12	—	1,3	1,9	1,9	2,9	—
0,14	—	1,4	2,0	2,0	3,0	—
0,20	1,6	1,6	2,2	2,2	—	1,8
0,35	1,9	1,9	2,5	2,5	3,5	2,0
0,5	2,0	2,2	2,8	2,8	—	2,1
0,75	2,3	2,5	3,3	3,3	—	2,6
1,0	2,6	2,8	—	3,6	—	—
1,5	2,7	3,0	—	3,8	—	—
2×3,5	—	—	4,6	4,6	—	—
2×0,5	—	—	5,2	5,2	—	—
2×0,75	—	—	5,8	5,8	—	—
3×0,35	—	—	4,9	4,9	—	—
3×0,5	—	—	5,4	5,4	—	—
3×0,75	—	—	6,8	6,8	—	—

Таблица 18.116. Нагревостойкие монтажные провода

Марка	Изоляция	Напряжение, В (в скобках — частота, Гц)	Диапазон сечений жил, мм²	Диапазон числа жил	Максимальная рабочая температура, °С	Кратковременная допустимая температура (или допустимая 1 раз), °С	Минимальное давление, Па
МКР, МРКТ, МРКЭ, МРКЭ-Т	Кремнийорганическая резина, оплетка лавсаном (Т — тропическое исполнение)	660 (400)	0,75—120	1	105	—	—
КМПОВ, КМПОЭВ, КМПОВЭ, КМПОЭВЭ	Облущенный полиэтилен, поливинилхлоридная оболочка с различной степенью экранирования	100 (10 ⁶) (0,08—0,2 мм²) 250 (10 ⁶) (0,12—0,35 мм²)	0,08—0,35	4—52	100	200	10 ⁻⁸
МПО, МПОЭ, МПОУ, МПОУЭ	Облущенный полиэтилен (У — жилы повышенной механической прочности)	220 (2000) 160 (4·10 ⁶)	0,12—0,75	7—49	100	200	10 ⁻⁴
МСТП, МСТПГ, МСТПЛ, МСТПЭ	Стекловолоконно, облущенный терморадационностойкий полиэтилен	500 (1000)	0,08—6,0	1	150	200	—
МЛТП, МЛТПЭ, МЛТПГ	То же, но вместо стекловолоконна применен лавсан	—	—	—	100	150	—
МДПО, МГДПО, МДПЭО, МГДПЭО	Облущенный полиэтилен	100 (10 ⁴)	0,12; 0,20	2	85	—	—
СФУ, СФУЭ	Стекловолоконно, фторопласт	380 (5000)	0,2—2,5	4—52	250	400	—
МФОЛ, МФЭ	Стекловолоконно, фторопласт	250 (5000)	0,2	7—20	200	—	—
ПМОФ	Фторопласт, лавсан особо гибкий	250 (2000)	0,35; 0,5	1	100	—	666
ПВМФО	Пленочная фторопластовая изоляция	2—6 кВ (50)	0,12—1,0	1	200	—	—

ся применять в условиях, когда возможна конденсация влаги на поверхности проводов.

Монтажные провода с комбинированной волокнистой и поливинилхлоридной или полиэтиленовой изоляцией (полиэтилен самозатухающий)*. При сечении жил 0,08—

0,14 мм² рабочее напряжение — до 380 В (2000 Гц), а при сечении 0,2—1,5 мм²—1000 В или соответственно постоянные напряжения 500 и 1500 В. Ассортимент и наружные диаметры проводов приведены в табл. 18.115.

Изготавливаются следующие марки: МШП — монтажный провод с волокнистой и полиэтиленовой изоляцией; МГШП — то же гибкий; МГШПЭ — то же экранированный; МГШПЭВ — экран в поливинилхлоридной оболочке.

Монтажные провода высоковольтные ПВМП-2 с полиэтиленовой изоляцией, рассчитанные на напряжения 2, 2,5 и 4 кВ (частота 50 Гц). Изготавливаются с жилами следующих сечений:

Сечение жилы, мм² . . .	0,12	0,35	0,75
Наружный диаметр, мм . . .	1,6	2,0	3,35

Провода могут работать при температуре от —60 до +85°С при влажности 98 % (+40°С) и давлении от 133,3·10⁻⁶ до 2,95·10⁵ Па при напряжении 0,5 номинального и воздействии вибрационных нагрузок.

Кабели и провода повышенной нагревостойкости изготавливаются с применением изоляции из сшитого путем облучения полиэтилена, кремнийорганической резины, фторопластов и комбинации стекловолокон с фторопластовой пленкой.

Все эти кабели и провода вибрационно стойкие, рассчитаны на применение при влаж-

ности до 98 % при 40°С, минимальная температура эксплуатации — 60°С.

Основные сведения о кабелях и проводах приведены в табл. 18.116.

* Выпускаются по ТУ 16-505.437-82 и ТУ 16-505.410-72.

18.17. ОБМОТОЧНЫЕ ЭМАЛИРОВАННЫЕ ПРОВОДА

Эмалированные провода удобно классифицировать по температурному индексу (ТИ), т.е. по температуре, °С, при которой провода сохраняют определенные свойства в течение базового ресурса 20 000 ч.

Сведения о температурных индексах и конструктивных данных основных типов медных эмалированных проводов приведены в табл. 18.117.

Эмалированные провода для электротехнического оборудования класса нагревостойкости А (ТИ 105) выпускаются как с изоляцией на основе масляных лаков — провод марки ПЭЛ, так и на основе синтетических лаков — провода марок ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1 и ПЭМ-2. Провода марки ПЭЛ имеют наименьшую толщину изоляции, обладают хорошими электроизоляционными характеристиками, однако механические свойства эмалевой изоляции и ее стойкость к растворителям невысокие. Поэтому эти провода применяются в основном для намотки катушек электрических аппаратов, рамок приборов и т. п. Для обмоток электрических машин эти провода могут применяться только при условии наложения на слой эмали обмотки из хлопчатобумажной, шелковой или синтетической пряжи.

Наиболее массовыми проводами, применяемыми для электрических машин и аппаратов в системах изоляции класса нагревостойкости А, являются провода с изоляцией на основе поливинилацеталевых смол ПЭВ-1 и ПЭВ-2, эмалированные поливинилформальдегидным лаком «винифлекс», и марок ПЭМ-1 и ПЭМ-2, эмалированные поливинилформальдевым лаком «метальвин». Высокая механическая прочность изоляции, ее высокие адгезионные свойства и стойкость этих проводов к действию ароматических растворителей позволяют использовать провода для обмоток электрических машин без наложения дополнительного слоя волокна.

Провода марок ПЭВ и ПЭМ имеют фактически равноценные электроизоляционные и физико-механические характеристики. Однако провода марки ПЭМ значительно превосходят провода ПЭВ по стойкости к воздействию трансформаторного масла, что позволяет применять их для обмоток масляных трансформаторов. Кроме того, существенным преимуществом проводов марки ПЭМ является их повышенная стойкость к таким хладагентам, как хладон-12 и хладон-22. Провода, эмалированные лаком «метальвин», предназначенные для работы в обмотках электродвигателей холодильных аппаратов, маркируются ПЭМФ.

Для систем изоляции класса нагревостойкости Е выпускаются обмоточные провода с изоляцией на основе полиуретанового лака — провода марок ПЭВТЛ-1 и ПЭВТЛ-2 (ТИ 120). Особенностью этих проводов являются термопластичные свойства изоляционного слоя (температура размягчения 160 °С), что ограничивает область их применения. Провода марок ПЭВТЛ предназначены для применения в приборостроительной, аппаратной и радиотехнической промышленности, эти провода могут также использоваться для обмоток электродвигателей малой мощности. Основным преимуществом этих проводов является способность облуживаться без предварительной зачистки изоляции.

Провода с температурным индексом 130 (системы изоляции класса нагревостойкости В) изолируются полиэфирными (полиэтилентерефталатными) лаками. В зависимости от типа применяемого лака провода маркируются: ПЭТВ — с изоляцией на основе лаков ПЭ-943 и ПЭ-939, ПЭТВ-ТС — с изоляцией, наложенной из расплава полиэфирного продукта марки ТС.

Провода с изоляцией на основе полиэфиров обладают хорошими электрическими и физико-механическими свойствами. К недостаткам проводов следует отнести пониженную стойкость к кратковременным тепловым перегрузкам (быстрое увеличение температуры до

Таблица 18.117. Нагревостойкость и конструктивные данные основных типов круглых медных эмалированных проводов

Марка проводов	Номинальный диаметр токопроводящей жилы, мм	Минимальная диаметр толщина изоляции, мм	Температурный индекс, °С	Действующая техническая документация
ПЭЛ	0,02—2,50	0,004—0,006	105	ГОСТ 2773-78
ПЭВ-1	0,02—2,50	0,006—0,055	105	ГОСТ 7262-78
ПЭВ-2	0,05—2,50	0,012—0,070		
ПЭМ-1	0,05—2,50	0,020—0,100	105	ГОСТ 10288-74
ПЭМ-2	0,05—2,50	0,030—0,130		
ПЭМФ	0,25—0,95	0,030—0,050	105	ТУ 16.505.583-77
ПЭВБЖ	0,02—0,050	0,004—0,008	105	ТУ 16.505.366-77
ПЭВД, ПЭВДД	0,10—0,51	0,015—0,035	105	ТУ 16.505.320-78
ПЭВТЛ-1	0,02—1,60	0,002—0,04	120	ТУ 16.505.446-77
ПЭВТЛ-2	0,02—1,60	0,004—0,06		
ПЭВТЛН-1	0,02—1,60	0,002—0,04	120	ТУ 16.505.446-77
ПЭВТЛН-2	0,02—1,60	0,004—0,06		
ПЭВТЛК	0,06—0,35	0,025—0,050	120	ТУ 16.505.480-73
ПЭТВ-2	0,06—2,50	0,010—0,07	130	ОСТ 16.0.505.001-80
ПЭТВ-2-ТС	0,06—2,50	0,010—0,07	130	ОСТ 16.0.505.001-80
ПЭТВМ	0,25—1,40	0,035—0,065	130	ТУ 16.505.370-78
ПЭТВ-Р	0,02—0,20	0,006—0,015	130	ТУ 16.705.110-79
ПЭТ-155	0,06—2,50	0,010—0,070	155	ГОСТ 21428-75
ПЭТМ	0,53—1,32	0,033—0,060	155	ТУ 16.505.935-76
ПЭФ-155	0,063—1,60	0,008—0,070	155	ТУ 16.505.673-77
ПЭТ-200	0,50—2,50	0,035—0,070	200	ТУ 16.505.937-76
ПНЭТ-нмид	0,030—2,50	0,003—0,05	240	ТУ 16.505.489-78

180—200 °С)—так называемым «тепловым ударом».

Провода марки ПЭТВМ с изоляцией на полиэфирной основе предназначены для механизированной намотки электродвигателей. Для изолирования этих проводов применяется лак ПЭ-939. Провода марки ПЭТВМ имеют несколько увеличенную толщину изоляции, что обеспечивает необходимую механическую прочность изоляции, которая требуется при механизированной намотке, так как при этом возникают дополнительные механические воздействия на провода (растяжение, многократные перегибы, удары, рывки, трение о металлические поверхности и т. п.).

Для систем изоляции класса нагревостойкости F (ТИ 155) применяются эмалированные провода марок ПЭТ-155, ПЭТМ и ПЭФ-155.

Провод марки ПЭТ-155 предназначен для массового применения в электромашиностроении. Провод изолирован лаком на полиэфиримидной основе, обладает высокой стойкостью к тепловому удару, хорошими электроизоляционными свойствами. Однако механические свойства изоляционного слоя недостаточно высоки, что не позволяет использовать провода для механизированной намотки. Для механизированной намотки рекомендуется использовать провод марки ПЭТМ с изоляцией на основе полиэфирциануратимидов (лак ПЭ-999) или на полиэфирамидимидной основе, либо провод марки ПЭФ-155 с изоляцией на полиэфирциануратимидной основе. Последний провод обладает повышенной стойкостью к действию холодильных агентов.

Для работы при 180—200 °С рекомендуется провод марки ПЭТ-200 с изоляцией на основе полиамидимидов, который обладает высокими электрическими и физико-механическими свойствами.

Для работы при 220—240 °С рекомендуется провод марки ПНЭТ-имид, имеющий биметаллическую жилу медь—никель (никель наносится гальваническим способом) и изоляционную пленку на основе полиимидного лака марки ПАК-1. Провод обладает высокой нагревостойкостью к тепловому удару, хорошими электроизоляционными свойствами, однако имеет пониженную механическую прочность изоляции на истирание.

Для рабочих температур 300—600 °С используют биметаллические проводники, изолированные тонкими неорганическими покрытиями в комбинации с органическими пропитками. Это, например, минеральная изоляция состава типа $K_2O \cdot PbO \cdot SiO_2$, условно называемая керамической, или так называемая стеклоэмаль $SiO_2 \cdot PbO \cdot B_2O_3$. Для пропитки изоляции и ее поверхностного покрытия используется органический состав. Провода маркируются ПЭЖБ и ПЭЖБ-700. Провод ПЭЖБ имеет биметаллическую жилу медь—никель и может использоваться для кратковременной работы при 600 °С, провод ПЭЖБ-700 в качестве проводника имеет биметалл серебро—никель и выдерживает кратковременное воздействие 700 °С.

Тончайшие эмалированные провода диаметром 0,02—0,05 мм выпускаются с изоляцией на основе поливинилацеталевого лака, полиэфирного лака и в ограниченном количестве на

полиуретановом лаке. Основное назначение этих проводов — обмотки для электроизмерительных приборов.

Для высокочувствительных приборов необходимо использовать провода, содержащие минимальное количество ферромагнитных включений, так как эти включения создают в подвижных рамках приборов дополнительный паразитный момент, который нарушает нормальную работу. Для указанных приборов могут быть рекомендованы безжелезные провода марки ПЭВБЖ (с изоляцией на поливинилацеталевом лаке), а также немагнитные провода марки ПЭВТЛ-Н с изоляцией на основе полиуретанового лака. Безжелезные и немагнитные эмалированные провода различаются по степени магнитной загрязненности, причем к немагнитным проводам с этой точки зрения предъявляются более жесткие требования.

Эмалированные провода с двойной изоляцией. К ним относятся провода с дополнительным термопластичным слоем марок ПЭВД и ПЭВДД. Изоляция этих проводов состоит из пленки лака «винифлекс» и дополнительного слоя из поливинилацеталевого лака — поливинилбутираля. При нагревании проводов до 120—150 °С термопластическое покрытие размягчается и склеивает витки, что заменяет операцию пропитки катушек. Провода с дополнительным терморезистивным слоем марки ПЭТВР имеют изоляцию, состоящую из пленки полиэфирного лака и пленки лака на эпоксидной основе. Провода марки ПЭВТЛК изолированы комбинацией полиуретанового и полиамидного лаков. Полиамидное покрытие увеличивает механическую прочность изоляции на истирание, при этом сохраняется способность провода к самообслуживанию. Одна из наиболее распространенных областей применения этих проводов — в матрицах вычислительных устройств.

Эмалированные провода из сплавов сопроствления находят применение в приборостроении, радиотехнике и других областях техники. Для эмалирования этих проводов применяется в основном лак «винифлекс» — провода ма-

Таблица 18.118. Расчетные размеры круглых эмалированных проводов с полиэфирной изоляцией

Номинальный диаметр проволоки, мм	Максимальный наружный диаметр провода, мм	Номинальный наружный диаметр проволоки, мм	Максимальный наружный диаметр провода, мм	Номинальный диаметр проволоки, мм	Максимальный наружный диаметр провода, мм	Номинальный диаметр проволоки, мм	Максимальный наружный диаметр провода, мм
0,063	0,084	0,224	0,264	0,750	0,830	1,400	1,500
0,071	0,094	0,250	0,300	0,800	0,880	1,500	1,600
0,080	0,104	0,280	0,330	0,850	0,930	1,600	1,710
0,090	0,116	0,315	0,364	0,900	0,990	1,700	1,810
0,100	0,128	0,355	0,414	0,950	1,040	1,800	1,910
0,112	0,140	0,400	0,460	1,000	1,090	1,900	2,010
0,125	0,154	0,450	0,510	1,060	1,150	2,000	2,120
0,140	0,170	0,500	0,560	1,120	1,210	2,120	2,240
0,160	0,198	0,560	0,630	1,180	1,270	2,240	2,360
0,180	0,220	0,630	0,700	1,250	1,350	2,360	2,480
0,200	0,240	0,710	0,790	1,320	1,420	2,500	2,630

Таблица 18.119. Расчетные размеры прямоугольных эмалированных проводов с полиэфирной изоляцией

Номинальный размер a проволоки, мм	Максимальный размер эмалированного провода A , мм	Максимальный размер эмалированного провода B при номинальном размере проволоки b , мм																
		2,00	2,24	2,50	2,80	3,15	3,55	4,00	4,50	5,00	5,60	6,30	7,10	8,00	9,00	10,00	11,20	12,50
0,80	0,94	2,16	2,40	2,66	2,96	3,31	3,71	4,16	4,66	5,19	5,79	6,49	—	—	—	—	—	—
0,90	1,05	2,16	2,40	2,66	2,96	3,31	3,71	4,16	4,66	5,19	5,79	6,49	7,29	—	—	—	—	—
1,00	1,15	2,16	2,40	2,66	2,96	3,31	3,71	4,16	4,66	5,19	5,79	6,49	7,29	8,19	—	—	—	—
1,12	1,27	2,16	2,40	2,66	2,96	3,31	3,71	4,16	4,66	5,19	5,79	6,49	7,29	8,19	9,19	—	—	—
1,25	1,41	2,17	2,41	2,67	2,97	3,32	3,72	4,17	4,67	5,20	5,80	6,50	7,30	8,20	9,20	10,20	—	—
1,40	1,56	2,17	2,41	2,67	2,97	3,32	3,72	4,17	4,67	5,20	5,80	6,50	7,30	8,20	9,20	10,20	11,40	—
1,60	1,76	—	2,41	2,67	2,97	3,32	3,72	4,17	4,67	5,20	5,80	6,50	7,30	8,20	9,20	10,20	11,40	12,70
1,80	1,96	—	—	2,67	2,97	3,32	3,72	4,17	4,67	5,20	5,80	6,50	7,30	8,20	9,20	10,20	11,40	12,70
2,00	2,16	—	—	—	2,97	3,32	3,72	4,17	4,67	5,20	5,80	6,50	7,30	8,20	9,20	10,20	11,40	12,70
2,24	2,42	—	—	—	—	3,33	3,73	4,18	4,68	5,21	5,81	6,51	7,31	8,21	9,21	10,21	11,41	—
2,50	2,68	—	—	—	—	—	3,73	4,18	4,68	5,21	5,81	6,51	7,31	8,21	9,21	10,21	—	—
2,80	2,98	—	—	—	—	—	—	4,18	4,68	5,21	5,81	6,51	7,31	8,21	9,21	—	—	—
3,15	3,33	—	—	—	—	—	—	—	4,68	5,21	5,81	6,51	7,31	8,21	—	—	—	—
3,55	3,76	—	—	—	—	—	—	—	—	5,21	5,81	6,51	7,31	—	—	—	—	—

рок ПЭВКТ, ПЭВКМ, ПЭВМТ, ПЭВММ и ПЭВНХ. В качестве проводникового материала для указанных марок проводов применяются соответственно константан твердый, константан мягкий, манганин твердый и мягкий, а также нихром. Провода, эмалированные полиэфирным лаком ПЭ-943, имеют маркировку ПЭТВКТ и ПЭТВКМ.

Эмалированные алюминиевые провода находят ограниченное применение. Эмалирование этих проводов производится в основном поливинилацетальевыми и полиэфирными лаками. Провода маркируются ПЭВА ПЭТВА. Электрические и физико-механические свойства изоляции алюминиевых проводов и медных находятся примерно на одном уровне, однако нагревостойкость алюминиевых проводов несколько выше.

Прямоугольные эмалированные провода изготавливаются с сечением токопроводящих жил до 30 мм². Провода эмалируются поливинилацетальевыми лаками — провода марок ПЭВП и ПЭМП, полиэфирными лаками — ПЭТВП, полиэфиримидными — ПЭТП-155 и полиимидными — ПНЭТП.

Более подробный ассортимент и расчетные размеры эмалированных проводов круглого и прямоугольного сечений на примере проводов с полиэфирной изоляцией приведены в табл. 18.118 и 18.119. Номинальные диаметры проволоки в этих таблицах соответствуют размерному ряду, рекомендованному стандартом МЭК.

18.18. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА С ВОЛОКНИСТОЙ, ЭМАЛЕВО-ВОЛОКНИСТОЙ, БУМАЖНОЙ И ПЛЕНОЧНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Обмоточные провода с эмалево-волоконной изоляцией применяются для изготовления обмоток электродвигателей, генераторов, трансформаторов и других электротехнических изделий при повышенных нагрузках на провод в процессе изготовления и эксплуатации. Для обмотки проводов применяются хлопчатобумажное волокно (провод марки ПЭБО), волокна из натурального шелка (провод марки ПЭШО), а также синтетические (лавсановые и капроновые) волокна (провода марок ПЭЛО, ПЭТВЛО, ПЭВТЛЛО, ПЭЛШКО и ПЭЛШКД). Хлопчатобумажное волокно обладает хорошей стойкостью к истирающим нагрузкам, однако оно достаточно гигроскопично и имеет значительную толщину. Волокна из натурального шелка имеют меньшую толщину, стойки к истирающим усилиям, однако стоимость волокон высока, поэтому более широкое применение находит изоляция из синтетических нитей (лавсан, капрон). Слой эмали существенно улучшает электрические свойства изоляции проводов. Марки и размеры с эмалево-волоконной изоляцией приведены в табл. 18.120.

Провода с волокнистой изоляцией (табл. 18.120) имеют двойную обмотку из хлопчатобумажного волокна (провод марки ПБД), шелкового (провод марки ПШД) или синтетического (провод марки ПЛД). Электроизоляционные характеристики проводов с одной волокнистой изоляцией невысоки, поскольку они определяются в основном воздушными промежутками в изоляции. Указанные провода в изделиях, как правило, подвергаются пропитке электроизоляционными лаками.

Провода с бумажной изоляцией (табл. 18.121) применяются в основном для обмоток масляных трансформаторов. Изоляция проводов марок ПБ и АПБ (алюминиевый проводник) выполняется путем обмотки кабельной бумагой толщиной не более 0,12 мм или телефонной бумагой. Для высоковольтных трансформаторов используются провода с усиленной бумажной изоляцией марки ПБУ. Для мощных силовых трансформаторов и реакторов выпускаются провода ПТБ и ПТБУ, кото-

Таблица 18.120. Основные типы обмоточных проводов с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией

Марка провода	Номинальные размеры проволоки, мм: круглая—диаметр (ϕ), прямоугольная—размеры сторон (a , b)	Удвоенная толщина изоляции, мм	Температурный индекс, °C	Действующая техническая документация
ПБД	ϕ 0,355—5,3	0,22—0,33	105	ГОСТ 16513-79
АПБД	ϕ 1,35—8,0 $a = 1,80 \div 5,6$, $b = 4,0 \div 16,0$	0,27—0,35 0,27—0,44	105	ГОСТ 16513-79
ПШД, ПЛД	$a = 0,80 \div 1,32$, $b = 2,80 \div 4,5$	0,15—0,20	105	ТУ 16.505.357-78
ПЭБО	ϕ 0,38—2,12	0,17—0,22	105	ГОСТ 16507-80
ПЭЛБД	ϕ 0,93—2,12	0,28—0,33	105	ТУ 16.505.357-78
ПЭШО	ϕ 0,05—1,56	0,08—0,16	105	ГОСТ 16.507-80
ПЭЛШКО	ϕ 0,10—1,56	0,08—0,16	105	ТУ 16.505.357-78
ПЭЛШКД	ϕ 0,75—1,45	0,19	105	ТУ 16.505.357-78
ПЭЛО	ϕ 0,05—1,32	0,08—0,14	105	ГОСТ 16.507-80
ПЭТВЛО	ϕ 0,20—1,32	0,12—0,18	130	ТУ 16.505.357-78
ПЭТВЛЛО	ϕ 0,20—1,32	0,12—0,18	120	ТУ 16.505.357-78

Таблица 18.121. Основные типы обмоточных проводов с бумажной изоляцией

Марка провода	Номинальные размеры проволоки, мм: круглая—диаметр (ϕ), прямоугольная—размеры сторон (a , b)	Удвоенная толщина изоляции, мм	Действующая техническая документация
ПБ	ϕ 1,18—5,20 $a = 1,0 \div 5,6$, $b = 3,0 \div 19,5$	0,3—5,76 0,45—4,4	ГОСТ 16512-80
АПБ	ϕ 1,32—8,0 $a = 1,80 \div 5,6$, $b = 4,00 \div 18,0$	0,3—5,76 0,45—4,4	ГОСТ 165512-80
ПБУ	$a = 1,80 \div 5,60$, $b = 6,7 \div 19,5$	1,35—4,4	ГОСТ 16512-80
ПТВ	$a = 1,80 \div 3,55$, $b = 3,75 \div 8,6$	0,72—1,92	ТУ 16.505.367-77
ПТВУ	$b = 3,75 \div 8,6$	2,0—4,4	ТУ 16.505.367-77

рые скручиваются из эмалированных прямоугольных проволок, а снаружи обматываются несколькими слоями кабельной бумаги. При скрутке производится транспонирование отдельных проволок в сечении по длине провода. Применение таких проводов позволяет снизить потери в обмотках примерно на 20 % за счет уменьшения потерь от вихревых токов и от уравнивающих токов в параллельных ветвях.

Высокочастотные обмоточные провода (табл. 18.122) находят применение в обмотках приборов, радиоустройств и других установок, работающих при высоких частотах. Для уменьшения дополнительных потерь от поверхност-

ного эффекта и эффекта близости жилы проводов скручиваются из отдельных эмалированных проволок. Выпускаются провода, отдельные проволоки в которых эмалируются масляной эмалью, а общая изоляция состоит из одной или двух обмоток натуральным шелком (провода марок ЛЭШО и ЛЭШД) либо лавсановой пряжей (провода марок ЛЭЛО и ЛЭЛД). Провода марки ЛЭП скручиваются из отдельных проволок, эмалированных полиуретановым лаком. Эти провода не имеют обмотки пряжей. Если такие провода обматываются капроновыми нитями, то они маркируются ЛЭПКО.

Токопроводящие жилы таких проводов могут содержать от 7 до 1100 изолированных проволок и работать при частотах до 100 кГц. Для обмоток повышенной нагревостойкости используются провода марок ЛЭТЛО и ЛЭНП. В последних отдельные проволоки изолированы полиэфиримидной эмалью. Эти провода предназначены для работы в системах изоляции класса нагревостойкости F (ТИ 155).

Обмоточные провода для погружных электродвигателей (табл. 18.123). У погружных электродвигателей, применяемых в насосах, предназначенных для перекачки нефти, а также воды из артезианских скважин и т. п., обмотка непосредственно подвергается действию перекачиваемой жидкости.

Для погружных электродвигателей выпускается ряд проводов с пленочной изоляцией. Это круглые провода марок ПЭТВПДЛ-3 и ПЭТВПДЛ-4 с изоляцией из слоя полиэфирной эмали и трех-четырёх слоев лавсановой пленки, подклеенной к эмалевой изоляции. Снаружи на пленочную изоляцию накладывается двухслойная обмотка из лавсановой пряжи с подклейкой и пропиткой лаком. Эти провода

Таблица 18.122. Основные типы высокочастотных обмоточных проводов по ГОСТ 16186-74

Марка провода	Сечение, мм ²	Число и номинальный диаметр медных проволок, мм	Температурный индекс, °C
ЛЭШО, ЛЭШД	0,0196—4,2	(10×0,05) — (1100×0,07)	105 (в пропитанном состоянии)
ЛЭЛО, ЛЭЛД	0,0196—4,2	(10×0,05) — (1100×0,07)	120 же
ЛЭПКО	0,0308—1,375	(8×0,07) — (175×0,10)	120 (в пропитанном состоянии)
ЛЭТЛО	1,633—19,93	(8×0,51) — (480×0,23)	130
ЛЭНП	11,24—56,73	(51×0,53) — (301×0,49)	155

Таблица 18.123. Основные типы обмоточных проводов с пленочной изоляцией

Марка провода	Номинальные размеры проволоки, мм: круглая—диаметр ($\varnothing$), прямоугольная—размеры сторон (a , b)	Удвоенная толщина изоля- ции, мм	Температурный индекс, °C	Действующая техни- ческая документация
ПЭТВПДЛ-3 ПЭТВПДЛ-4	$\varnothing 1,74-2,83$	0,56—0,58 0,66—0,68	120	ТУ 16.505.494-73
ППФ, ППФИ	$a = 1,68 \div 2,26$, $b = 2,44 \div 3,28$	1,04	180	ТУ 16.505.638—76
ППИ ППИ-У	$\varnothing 2,00-3,15$	0,4 0,38	180	ТУ 16.705-159-80
ППИП-1 ППИП-2 ППИПК-1 ППИПК-2 ППИПК-3	$a = 1,12 \div 4,00$, $b = 7,50 \div 12,50$	0,30 0,40 0,23 0,30 0,35	180	ТУ 16-705.035-82

используются в погружных маслозаполненных электродвигателях при температурах $-60 \div +120^\circ\text{C}$.

Провода марки ППФ изолируются несколькими слоями обмотки неориентированной пленки из фторопласта-4 и одним слоем ориентированной пленки. При $370-410^\circ\text{C}$ слои пленки спекаются, что обеспечивает высокую монолитность изоляции. Провода марки ППФИ поверх фторопластовой изоляции имеют еще обмотку дублированной полиимидно-фторопластовой пленкой, провода марок ППИ и ППИ-У, а также прямоугольные провода типа ППИП изолируются двумя или тремя лентами дублированной полиимидно-фторопластовой пленки. Эти провода также подвергаются термообработке для получения монолитной изоляции. Провода типов ППФ, ППФИ, ППИ и ППИП применяются в погружных электродвигателях, работающих в среде воды и пластовой жидкости (водонефтемасляной эмульсии) при $-60 \div +180^\circ\text{C}$ и давлении $1,2 \cdot 10^7$ Па.

18.19. ПРОВОДА СО СТЕКЛОВОЛОКНИСТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Наиболее распространенными проводами со стекловолоконной изоляцией (табл. 18.124) являются медные или алюминиевые провода, изолированные двумя слоями стеклянного волокна, пропитанного глифталевым (провода марок ПСД и АПСД) или кремнийорганическим (провода маркируются ПСДК) лаками. Провода с уменьшенной толщиной изоляции маркируются ПСДТ, ПСДКТ и т. д. Для обмотки этих проводов применяется утоненное стекловолокно. Провода с лакированной поверхностью имеют марки ПСД-Л, ПСДК-Л и т. д. Выпускаются также провода с эмалево-стекловолоконной изоляцией марки ПЭТВСД. Эти провода используются для тяговых электродвигателей, обмотки которых находятся в тяжелых эксплуатационных условиях. Изоляция состоит из слоя полиэфирной или полиэфиримидной эмали и двухслойной обмотки

Таблица 18.124. Основные типы обмоточных проводов со стекловолоконной изоляцией

Марка провода	Номинальные размеры токопроводящей жилы, мм: круглая—диаметр ($\varnothing$), прямоугольная—размеры сторон (a , b)	Удвоенная толщина изоля- ции, мм	Температур- ный индекс, °C	Действующая техниче- ская документация
ПСД, ПСД-Л	$\varnothing 1,0-5,0$ $a = 0,9 \div 5,6$, $b = 2,24 \div 12,5$	0,23—0,35 0,32—0,50 0,27—0,42	155	ГОСТ 7019-80
ПСДК, ПСДК-Л	$\varnothing 1,0-5,0$ $a = 0,9 \div 5,6$, $b = 2,24 \div 12,5$	0,23—0,35 0,32—0,50 0,27—0,42	180	ГОСТ 7019-80
ПСДТ, ПСДТ-Л	$\varnothing 0,35-2,12$	0,18—0,25	155	ГОСТ 7019-80
ПСДКТ, ПСДКТ-Л	$\varnothing 0,315-2,12$ $a = 0,9 \div 3,55$, $b = 2,24 \div 10,00$	0,14—0,24 0,26—0,34 0,22—0,24	180	ГОСТ 7019-80
ПЭТВСД	$\varnothing 1,16-2,44$ $a = 1,01 \div 3,53$, $b = 2,83 \div 8,0$	0,35 0,51—0,61	155	ТУ 16.505.353-77
АПСД	$\varnothing 1,60-3,05$ $a = 1,8 \div 5,6$, $b = 3,35 \div 14,0$	0,27—0,33 0,39—0,50 0,27—0,40	155	ТУ 16.505.408-78
ПОЖ	$\varnothing 0,315-3,00$ $a = 0,9 \div 3,55$ $b = 2,12 \div 10,6$	0,28—0,36 0,44—0,62 0,36—0,43	300	ТУ 16.505.399-77

стекловолокном с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком.

Нагревостойкость проводов со стекловолокнистой изоляцией в зависимости от пропиточного лака соответствует температурному индексу 155 (провода марок ПСД, ПСДТ, ПЭВСД) или 180 (провода марок ПСДК, ПСДКТ).

Для увеличения нагревостойкости проводов используют биметаллические проводники (например, биметаллический проводник медь—никель). Никелевое покрытие защищает медь от окисления при высоких температурах. Провода с биметаллической жилой имеют марку ПНСДК.

Для эксплуатации при 500—600 °С предназначены провода марки ПОЖ. В качестве проводника этих проводов используется биметаллическая проволока медь—никель; для изоляции применяется стекловолокно на кремний-органическом замасливателе, пропитанное органосиликатными материалами. Провода марки ПОЖ предназначены для эксплуатации при 300 °С в течение 12 000 ч, при 500 °С в течение 500 ч и при 600 °С в течение 150 ч.

18.20. ПРОЧИЕ ТИПЫ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

Микропровода в сплошной стеклянной изоляции получают путем вытягивания тонкой металлической нити из разогретого прутка металла, находящегося в стеклянной трубке. Выпускаются провода марки ПССМ с манганиновой жилой. Диаметр проводов 3—100 мкм. Такие провода используются для изготовления резисторов. Медные провода марки ПМС выпускаются диаметром 5—200 мкм с толщиной изоляции 1—35 мкм. Пробивное напряжение изоляции этих проводов очень высокое (может достигать 2000 В) за счет того, что поверхность проводника исключительно гладкая, почти полированная. У этих проводов практически отсутствуют точечные повреждения изоляции. Однако существенным недостатком проводов является хрупкость стеклянной изоляции. Допустимый радиус изгиба в холодном состоянии равен 100 диаметрам провода, поэтому намотка изделий должна осуществляться при подогреве провода до температуры, при которой стекло становится пластичным.

Обмоточные провода с дельта-асбестовой изоляцией марки ПДА выпускаются только прямоугольного сечения, размер прямоугольных проводов (1,25—5,0) × (4,0—7,5) мм.

Дельта-асбестовая изоляция состоит из асбестовых волокон, пропитанных и подклеенных к проводу с помощью глифталевого лака. Эти провода обладают хорошей нагревостойкостью (ТИ 155). Изоляция проводов имеет высокую механическую прочность, что позволяет использовать провода в тяжелых условиях изготовления обмоток электрических машин при применении ударных нагрузок на провод. К недостаткам дельта-асбестовой изоляции следует отнести сравнительно большую ее толщину (0,15—0,20 мм) и невысокую электрическую прочность — пробивное напряжение изоляции составляет около 400 В.

Сверхпроводящие и криопроводниковые обмоточные провода. Сверхпроводящие обмо-

Таблица 18.125. Характеристики одножильных сверхпроводящих обмоточных проводов

Материал	Критические токи при 2 Тл, А	Наружный диаметр провода, мм	Диаметр проволоки по сверхпроводнику, мм	Толщина изоляции, мм	Стабилизирующая обложка
Сплав НЦ-50	200	0,32	0,25	0,02	Латунь
Сплав НТ-50	140	0,32	0,25	0,02	Медь

точные провода нашли применение в обмотках мощных электромагнитов, в соленоидах, предназначенных для физических исследований. Криопроводниковые обмоточные провода используются в криогенераторах и криотрансформаторах.

Сверхпроводящие обмоточные провода выпускаются в одножильном и многожильном исполнении.

Одножильные провода представляют собой жилу из легко деформируемых сверхпроводящих сплавов (ниобий—титан, ниобий—цирконий, ниобий — цирконий — титан), заключенную в оболочку из стабилизирующего металла (меди) и изолированную эмалировочными лаками.

Характеристики некоторых одножильных сверхпроводящих проводов приводятся в табл. 18.125.

В поле с индукцией 6 Тл критические токи обоих проводов равны и составляют примерно 50 А.

Многопроволочные провода скручиваются из круглых стабилизированных сверхпроводящих проволок. Межпроволочное пространство заполняется стабилизирующим металлом (индием). В некоторых конструкциях проводов для дополнительной стабилизации используется медная проволока диаметром, равным диаметру сверхпроводящей проволоки. В качестве изоляции для многопроволочных проводов применяется обмотка или оплетка синтетическими волокнами либо обмотка пленками. Некоторые параметры скрученных индированных проводов приведены в табл. 18.126.

Основные типы и конструкции криопроводниковых обмоточных проводов приведены в табл. 18.127. Исходным материалом для токопроводящих жил служат слитки алюминия А999. Существующая технология волочения тонких проволок из слитков позволяет обеспечить увеличение проводимости алюминия при криогенных температурах в 1000—1500 раз.

18.21. ЦЕНЫ НА КАБЕЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Цены на кабельные изделия определяются Прейскурантом 15-09 (М.: Прейскурантиздат, 1981). Приведенные в этом прейскуранте цены действуют с 1982 г. До 1984 г. издано 31 дополнение к прейскуранту, в каждое из которых входят цены на ряд разнообразных кабельных изделий (либо цены на новые изделия, либо измененные цены на ранее выпускавшиеся из-

Таблица 18.126. Характеристики многожильных сверхпроводящих обмоточных проводов

Количество элементарных проволок в проводе и способ скрут- ки	Критический ток, А, при 6 Тл для сплавов			Количество элементар- ных проволок в проводе	Критический ток, А, при 6 Тл для сплавов		
	Т-60, диа- метр прово- локи 0,3 мм	НТ-50, диаметр проволоки			Т-60, диа- метр прово- локи 0,3 мм	НТ-50, диаметр проволоки	
		0,5 мм	1,0 мм			0,5 мм	1,0 мм
<i>Круглые</i>				<i>Плоские</i>			
7	170	560	2240	6	170	560	2240
49(7×7)	1175	3900	15 670	9	250	840	3350
133(7×19)	3530	11 750	47 000	11	300	1025	4100
19	560	1675	6700	12	340	1120	4475
133(19×7)	3025	10 070	40 285	13	365	1210	4850
361(19×19)	9075	30 200	120 850				

Таблица 18.127. Основные типы и конструкции криопроводниковых обмоточных проводов

Марка провода	Наименование	Конструкция жилы		Диаметральная толщина изоляции, мм		Диаметр готового провода, мм
		Число элемен- тарных проволок	Диаметр элемен- тарных проволок, мм	элемен- тарных проволок	провода	
ПАЛКО	Провод криопроводниковый обмоточный с алюминиевой жилой, изолированной лавсановым волокном	1	0,8—2,0	0,16—0,20	—	0,96—2,20
ПАЭКО-имид	Провод криопроводниковый обмоточный с алюминиевой жилой, изолированный полиимидным лаком ПАК-1	1	0,3—2,0	0,035—0,07	—	0,335—2,07
ПАЭЛКО	Провод многожильный с алюминиевыми проволоками, эмалированными полиимидным лаком, в общей лавсановой обмотке	25 300	0,3 0,3	0,015 0,015	0,20 0,20	2,0 8,34
ПАОП	Провод с жилой из алюминиевой фольги, изолированной лавсановой пленкой, дублированной полиэтиленом	1	Фольга 0,05×100	0,07	—	0,12×100

Таблица 18.128. Примерные цены на медную и алюминиевую проволоку, неизолированные провода, шины и ленты, контактные провода и коллекторные полосы

Наименование кабельной продукции	Техническая докумен- тация	Цены, руб за 1 т
Медная проволока круглая мягкая марки ММ	ГОСТ 2112-79	1290—2920
Медная проволока круглая твердая марки МТ	ГОСТ 2112-79	1260—92 710 (Ø 0,02 мм)
Медная проволока прямоугольного сечения мягкая марки ПММ	ГОСТ 434-78	1410—1630
Проволока медная прямоугольного сечения твердая ПМТ	ГОСТ 434-78	1380—1600
Алюминиевая проволока круглая мягкая марки АМ	ГОСТ 6132-79	1050—13 400 (Ø 0,1 мм)
Алюминиевая проволока круглая твердая марки АТ	ГОСТ 6132-79	1030—13 360
Алюминиевая проволока круглая полутвердая марки АПТ	ГОСТ 6132-79	1050—13 400
Неизолированные провода медные марки М	ГОСТ 839-80	1345—1385
Неизолированные провода алюминиевые марки А	ГОСТ 839-80	980—1015
Неизолированные провода сталеалюминиевые марки АС	ГОСТ 839-80	780—965
Неизолированные провода алюминиевые коррозионно-стойкие марки АКП	ГОСТ 839-80	995—1015
Неизолированные провода сталеалюминиевые коррозионно-стойкие марок: АСКС, АСКП АСК	ГОСТ 839-80 ГОСТ 839-80 ГОСТ 839-80	785—885 795—1030 1030—1055
Неизолированные провода из нетермообработанного алюминевого сплава марки АН	ГОСТ 839-80	1120—1150
Неизолированные провода из термообработанного алюминевого сплава марки АЖ	ТУ 16.505.397-72 ТУ 16.505.397-72	1625—1660 1380—1450
Полые воздушные провода медные марки ПМ		
Полые воздушные провода алюминиевые марки ПА		
Неизолированные провода гибкие медные марок: МА МГ, МГЭ	ГОСТ 20685-75 ГОСТ 20685-75 ГОСТ 4775-75	1425—1485 1450—1475 1110—1145
Многопроволочные неизолированные биметаллические сталеалюминиевые провода марок ПБСМ1 и ПБСМ2		

Продолжение табл. 18.128

Наименование кабельной продукции	Техническая докумен- тация	Цены, руб за 1 т
Медные шины мягкие марки ШММ	ГОСТ 434-78	1415—1480
Медные шины твердые марки ШМТ	ГОСТ 434-78	1435—1500
Шины твердые из бескислородной меди марки ШМТВ	ГОСТ 434-78	1455—1520
Медные ленты мягкие марки ЛММ	ГОСТ 434-78	1410—2200
Медные ленты твердые марки ЛМТ	ГОСТ 434-78	1370—2100
Неизолированные алюминиевые шины марки ШАТ	ТУ 16.705.002-77	1060—1140
Прессованные алюминиевые шины из алюминия и алю- миниевого сплава марок АДЗ1Т, АДЗ1Т1 и АДО	ГОСТ 15176-84	1140
Медные коллекторные профили марки ПКМ	ГОСТ 3568-83	1420—1700
Коллекторные профили из меди, легированной серебром, марки ПКМС	ТУ 16.501.013-73	1620—1645
Контактные провода медные круглые марок МКФ, МКФО	ГОСТ 2584-75	1210—1235
Пруток алюмомедный марки ПАМ-8	ТУ 16.705.144-80	1975

Т а б л и ц а 18.129. Цены трехжильных силовых кабелей, руб/км

Марка кабеля	Сечение жил, мм ²											
	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
СГ (1 кВ)	1025	1230	1520	1960	2420	3140	4160	5420	6650	8190	9750	12 150
СГ (10 кВ)	—	—	2600	3150	3710	4510	5710	7100	8360	9800	11 480	14 000
АСГ (1 кВ)	900	970	1090	1260	1470	1780	2200	2700	3160	3700	4350	5450
АСГ (10 кВ)	—	—	2250	2450	2700	3100	3650	4270	4800	5400	6000	7000
АСБ (1 кВ)	990	1070	1205	1390	1620	1930	2370	2900	3340	3850	4490	5450
ЦАСБ (10 кВ)	—	—	—	2820	3050	3390	3870	4460	4920	5440	6170	—
ОСБ (20 кВ)	—	—	—	8300	9100	10 300	11 850	13 250	14 450	15 900	17 550	—
ОСБ (35 кВ)	—	—	—	—	—	—	—	—	17 180	19 000	—	—
ААГ (1 кВ)	400	450	520	610	720	890	1100	1380	1640	1960	2400	2980
ААБл (1 кВ)	755	835	935	1040	1175	1400	1655	1995	2310	2670	3160	3830
ААШв (1 кВ)	570	630	720	850	1000	1220	1510	1875	2200	2600	3060	3780
ААГ (10 кВ)	—	—	1170	1270	1400	1580	1830	2140	2430	2790	3270	3920
ААБл (10 кВ)	—	—	1795	1905	2060	2270	2570	2920	3260	3670	4200	4960
ААШв (10 кВ)	—	—	1640	1770	1920	2150	2440	2810	3170	3600	4100	4900
ВВГ (6 кВ)	—	1600	1920	2390	2940	3650	4600	5750	6870	8160	9680	12 160
АВВГ (6 кВ)	—	1330	1420	1520	1790	2080	2480	2850	3220	3660	4180	5000
ПВГ (6 кВ)	—	1370	1650	2090	2600	3270	4040	5130	6180	7480	8860	11 250
АПВГ (6 кВ)	—	1100	1150	1290	1450	1700	1920	2240	2540	2900	3360	4070
ЦАСБ (6 кВ)	—	—	—	2300	2460	2960	3320	3760	4450	4920	5480	—

Т а б л и ц а 18.130. Цены трехжильных кабелей СРГ и АВРГ на напряжение 660 В, руб/км

Марка кабеля	Сечение жил, мм²															
	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
СРГ	530	560	655	770	855	1100	1470	2040	2590	3450	4510	5970	7200	8760	10 600	—
АВРГ	—	—	175	215	265	365	530	775	1045	1450	1800	2410	3030	3770	4640	6100

Т а б л и ц а 18.131. Стоимость основного оборудования и материалов для сооружения (110—220 кВ кабельных линий)

Наименование	Единица	Стоимость единицы, руб.	Наименование	Единица	Стоимость единицы, руб.
Одна фаза маслонаполнен- ного кабеля 110 кВ сред- него давления сечением 270 мм ² :			Одна фаза кабеля марки МВДТ 110 кВ для затяги- вания в стальной трубо- провод:		
марка МНСА	км	17 500	сечением 270 мм ²	км	14 000
марка МНСК-4*	км	19 600	сечением 425 мм ²	км	16 370
марка МНСК-6*	км	22 700	Одна фаза кабеля сечением 550 мм ² марки МВДТ	км	27 630
Одна фаза маслонаполнен- ного кабеля 110 кВ сред- него давления марки МНСК-4:			220 кВ для затягивания в стальной трубопровод		
сечением 150 мм ²	км	15 000	Концевая муфта для одной фазы маслонаполненного кабеля среднего давле- ния:		
сечением 550 мм ²	км	24 500	110 кВ	шт.	1000
Одна фаза маслонаполнен- ного кабеля 220 кВ сред- него давления сечением 500 мм ² :			220 кВ	шт.	3750
марка МНСА	км	32 400	Концевая муфта для одной фазы кабеля в стальном трубопроводе с маслом под давлением:		
марка МНСК-6	км	38 700	110 кВ	шт.	1100
Одна фаза маслонаполнен- ного кабеля 220 кВ сред- него давления марки МНСА с 16 стальными провоками в защитном покрове:			220 кВ	шт.	2500
сечением 350 мм ²	км	25 240	Соединительная муфта для одной фазы маслонапол- ненного кабеля:		
сечением 625 мм ²	км	37 000	110 кВ	шт.	675
			220 кВ	шт.	1140

Продолжение табл. 18.131

Наименование	Единица	Стоимость единицы, руб.	Наименование	Единица	Стоимость единицы, руб.
Стопорная муфта для одной фазы маслонаполненного кабеля:			Масло марки МН-4 для маслонаполненных кабелей	км	145
110 кВ	шт.	2500	Масло марки С-220 для заполнения трубопровода кабельных линий высокого давления	км	960
220 кВ	шт.	6650	Насосный агрегат для автоматической подпитки кабельной линии в стальном трубопроводе	шт.	1200
Соединительная муфта на три фазы кабельной линии в стальном трубопроводе:			Стальные трубы с внутренним диаметром 197 мм и толщиной стенки 10 мм для сооружения кабельной линии	км	5860
на линии 110 кВ	шт.	722	Кабельный ввод в трансформатор для маслонаполненного кабеля высокого давления на 220 кВ	шт.	3570
на линии 220 кВ	шт.	1200			
Разветвительная муфта на три фазы кабеля в стальном трубопроводе:					
110 кВ	шт.	710			
220 кВ	шт.	870			
Бак давления для подпитки маслонаполненных кабелей:					
типа БД-5-0,25	шт.	1390			
типа БД-5-0,5	шт.	1390			

* Цифра 4 (6) через черточку в обозначении марки кабеля показывает, что бронепокров выполнен из стальных проволок диаметром 4 (6) мм.

Таблица 18.132. Цены установочных проводов на напряжение 660 В, руб/км

Марка провода	Сечение жилы, мм²														
	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	90	120
АПВ	—	—	—	—	24—	30—	40—	63—	90—	130—	176—	235—	315—	430—	540—
АПВВ (2 жилы)	—	—	—	—	41	57	71	110	—	—	—	—	—	—	—
АПВВ (3 жилы)	—	—	—	—	58	81	127	—	—	—	—	—	—	—	—
ППВ (2 жилы)	—	35	45	58	81	127	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ППВ (3 жилы)	—	50	63	81	117	185	—	—	—	—	—	—	—	—	—
АПРТО (2 жилы)	—	—	—	—	93	120	155	225	320	465	630	800	1030	1330	1640
АПРТО (3 жилы)	—	—	—	—	120	145	185	260	395	600	840	990	1200	1600	2020
ПВ1	15,5	19	23,5	33	45,5	68	96	156	237	360	500	695	960	1295	—
ПВ2	—	—	—	—	52	75	108	175	255	380	515	720	980	1310	—
ПВ3	18,7	21,5	24,5	35	54	79	113	180	270	400	550	770	1060	1435	—
ПВ4	20,4	24	28	37	55	82	117	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 18.133. Цены контрольных кабелей и кабелей управления, руб/км

Марка кабеля		Сечение жил, мм ²																	
		0,75	0,75	1,0	1,0	1,5	1,5	2,5	2,5	4	4	6	6	10	10	0,35	0,35	0,5	0,5
КВВГ	Число жил	4	61	4	61	4	61	4	37	4	10	4	10	—	—	—	—	—	—
	Цена	145	1210	180	1550	195	1970	260	1760	375	850	495	1140	—	—	—	—	—	—
КНР	Число жил	—	—	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	—	—	—	—
	Цена	—	—	108	225	122	260	150	325	195	425	240	585	335	915	—	—	—	—
АКВВГ	Число жил	—	—	—	—	—	—	4	37	4	10	4	10	4	10	—	—	—	—
	Цена	—	—	—	—	—	—	170	960	220	445	260	555	365	775	—	—	—	—
КУПР	Число жил	4	37	4	37	4	37	—	—	—	—	—	—	—	—	4	108	4	108
	Цена	200	835	210	995	250	1415	—	—	—	—	—	—	—	—	150	1550	160	1760

Таблица 18.134. Цены монтажных проводов, руб/км

Марка кабеля	Сечение жил, мм²									
	0,08	0,10	0,12	0,14	0,20	0,35	0,5	0,75	1,0	1,5
МШВ	8,8	—	—	—	11,5	14,2	16,9	21,8	26,8	34,8
МГШВ (1 жила)	—	—	10,8	11,4	12,7	16,8	20,8	27,6	34	43,9
МГШВЭ (2 жилы)	—	—	—	—	—	92	105	127	—	—
МГШВЭ (3 жилы)	—	—	—	—	—	136	140	170	—	—
МПСПО (1 жила)	—	—	17	—	18	20,5	21	28	—	42
ППВ, ПМОВ	—	—	4,3	—	5,3	—	9,5	12,6	—	—
КМПЭВ (4 жилы)	—	—	—	—	—	280	285	310	360	410
КМПЭВ (52 жилы)	—	—	—	—	—	2980	3080	3560	4320	4950

Таблица 18.135. Цены обмоточных проводов и проводов из сплавов повышенного сопротивления, руб. за 1000 кг

Марка провода	Диаметр провода, мм							
	0,02	0,04	0,08	0,16	0,35	0,63	1,20	2,44
ПЭЛ	300 000	23 000	3000	1700	1350	1230	1090	1015
ПЭВ-2	—	—	7200	3370	2100	1650	1480	1420
ПЭВА	—	—	—	—	—	2080	1580(1,18)	—
ПЭТВ-1	—	—	7400	3430	2150	1710	1500	—
ПЭВТЛ-2	370 000	48 000	9000	4180	2040	1890	1540	5100
ПЭВД	—	—	—	—	2360	2100	—	—
ПЭМФ	—	—	—	—	2330	1825	—	—
ПЭВКТ-2	—	97 000	13 900	7040	4650	4020	—	—
ПЭВМТ-2	381 000	92 000	13 900	7240	4770	4160	—	—
ПЭВНХ-2	1 000 000	198 000	84 000	34 000	24 500(0,36)	—	—	—
ПЭФ-155	—	—	—	—	2350	1900	1650(1,18)	—
ПНЭТ-имид	—	367 000	92 000	30 000	12 900	8800	7200(1,18)	5150
ПЭЛО	—	—	—	—	2950	2000	1610(1,18)	1600(2,5)
ПЭТВСД	—	—	—	—	—	—	3335	2200
ПБ	—	—	—	—	—	—	1520(1,26)	1275(2,5)
ПСД	—	—	—	—	—	—	2255(1,18)	1660
ПСДК	—	—	—	—	13 400	4950	2650(1,18)	—

Таблица 18.136. Цены прямоугольных обмоточных проводов, руб. за 1000 кг

ПЭВП	Сечение, мм ² Цена	До 3 1875	3,1—5 1820	5,1—10 1705	10,1—15 1625	—	—	—	—
ПЭТВП	Сечение, мм ² Цена	До 3 1875	3,1—5 1820	5,1—9 1705	9,1—13 1625	13,1—17 1615	17,1—21 1610	21,1—25 1605	—
ПСД	Сечение, мм ² Цена	До 2,5 2075	3,1—5,0 2020	5,1—10 1725	10,1—15 1590	15,1—20 1525	20,1—30 1475	30,1—40 1460	40,1—80 1450
ПСДК	Сечение, мм ² Цена	До 2,5 2170	3,1—5,0 2065	5,1—10 1760	10,1—15 1635	15,1—20 1560	20,1—30 1500	30,1—40 1490	40,1—80 1470
ПСОТ	Сечение, мм ² Цена	3,0—5,0 2480	5,01—8,5 2060	—	—	—	—	—	—
ППЛБО	Сечение, мм ² Цена	До 5,0 1730	5,1—10,0 1660	10,1—15,0 1590	15,1—20,0 1535	20,1—30,0 1500	30,0 и выше 1440	—	—

деля). Цены на все кабельные изделия изложить в настоящем справочнике не представляется возможным. Поэтому в табл. 18.128 — 18.136 приведены цены для характерных типов различных кабельных изделий, по которым можно также составить представление о ценах марок кабелей и проводов близких к ним конструкций.

Приведенные цены не следует использовать как финансовый документ, так как цены в прейскуранте периодически изменяются в течение времени.

Для вычисления длины эмалированного провода (м) массой 1 кг можно использовать формулу

$$l = 1 / [\pi d (\rho_m d/4 + \rho_\Delta \Delta)],$$

где d — диаметр провода, м; Δ — толщина эмали, м; ρ_m — плотность металла жилы, кг/м³; ρ_Δ — плотность эмали (примерно 1400 кг/м³).

Для неизолированной проволоки Δ равно нулю.

Список литературы

18.1. Белоруссов Н. И., Саакян А. Е., Яковлева А. И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. М.: Энергия, 1979. 356 с.

18.2. Техническая документация на муфты для силовых кабелей с бумажной и пластмассовой изоляцией до 35 кВ. М.: Энергоиздат, 1982. 327 с.

18.3. Шварцман Л. Г. Муфты силовых кабелей высокого напряжения. М.: Энергия, 1977. 175 с.

18.4. Пешков И. Б. Обмоточные провода. М.: Энергоатомиздат, 1983. 350 с.

18.5. Ларина Э. Т. Силовые кабели и кабельные линии. М.: Энергоатомиздат, 1984. 368 с.

18.6. Основы кабельной техники/Под ред. В. А. Привезенцева. М.: Энергия, 1975. 472 с.

Раздел 19

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ИЗОЛЯТОРЫ

СОДЕРЖАНИЕ

19.1. Общие требования к электроизоляционным конструкциям	72	прочности изоляторов (81). Расчет опорного изолятора (81). Электрический расчет ввода с бумажно-масляной изоляцией (82)	
19.2. Электрическая прочность типовых электроизоляционных промежутков	75	19.4. Изоляторы переменного тока высокого напряжения 50 Гц	83
Общие сведения (75). Газовые промежутки (75). Воздушные промежутки вдоль поверхности изолятора (77). Промежутки в масле вдоль поверхности твердого диэлектрика (78). Бумажно-масляная изоляция (78). Электрическая прочность фарфоровых изделий (79)		19.5. Высоковольтные вводы на 110 кВ и выше	89
19.3. Расчеты изоляторов	79	19.6. Линейные изоляторы	91
Общие сведения (79). Расчет электрических полей (79). Расчет механической		19.7. Перспективы применения электроконструкционных пластмасс в изоляторной технике	92
		19.8. Конструкции стеклопластиковых изоляторов	93
		Список литературы	94

19.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫМ КОНСТРУКЦИЯМ

Общие сведения

Электрические изоляторы и сооружения из них представляют собой самостоятельные конструкции, используемые в распределительных устройствах, на линиях электропередачи или в различного рода электротехнических установках, а также конструкции, входящие в состав многих электрических аппаратов. Во всех случаях изоляторы выполняют определенные функции: с их помощью осуществляется механическое крепление токоведущих частей, работающих под высоким напряжением, в некоторых случаях передается механическое движение, например от привода к подвижному контакту коммутационного аппарата.

Как элементы механического крепления изоляторы обеспечивают необходимое взаимное расположение токоведущих, заземленных и других частей установки и тем самым требуемый уровень электрической прочности изоляционных промежутков на всех участках.

Основные характеристики изоляторов — габариты, масса, стоимость — существенно влияют на общие технико-экономические показатели всей установки в целом. Это влияние резко усиливается с увеличением номинального напряжения. В установках сверхвысокого напряжения характеристики изоляторов могут иметь решающее значение, от них может зависеть целесообразность создания всей установки.

Изоляторы, работающие в составе электротехнической установки, подвергаются электрическим, механическим и тепловым воздействиям, а также воздействиям, обусловленным контактами с окружающей средой. Комплекс этих воздействий, характеризуемых соответственно напряжениями, температурами, механическими усилиями и др., определяет условия работы изоляторов и их поведение в эксплуатации.

Изоляция внешняя и внутренняя

В любом изоляторе или изоляционной конструкции можно выделить:

внешнюю изоляцию — изоляционные промежутки в атмосферном воздухе, в том числе и промежутки вдоль поверхностей изоляторов; внутреннюю изоляцию — изоляционные промежутки, заполненные газообразными, жидкими или твердыми диэлектрическими материалами или их комбинацией, но не атмосферным воздухом.

Целесообразность выделения в изоляционной конструкции внешней и внутренней изоляции обусловлена специфическими особенностями соответствующих изоляционных промежутков, существенными различиями в методах их проектирования и испытания.

На электрическую прочность внешней изоляции сильное влияние оказывают атмосферные условия. Разрядные напряжения чисто воздушных промежутков зависят от давления, температуры и влажности воздуха, а характеристики промежутков в воздухе вдоль поверхностей изоляторов — от количества и свойств загрязнений на этих поверхностях. В свою очередь характеристики слоя загрязнения зависят:

от степени загрязненности атмосферы, т. е. от количества и мощности источников загрязнения, их расположения, от ветровых условий; от химического состава загрязняющего вещества, особенно от содержания водорастворимых и цементирующихся компонентов, определяющих проводимость и прочность слоя загрязнения;

от аэродинамических свойств изолятора, определяющих поле скоростей воздушного потока у поверхности изолятора и, следовательно, скорость осаждения загрязнений;

от ветровых условий и интенсивности мокрых осадков в данной местности, определяющих интенсивность осаждения и удаления загрязнений, а также степень увлажнения слоя на поверхности изолятора.

Таким образом, многие факторы, влияю-

щие на интенсивность загрязнения поверхности изолятора и свойства слоя загрязнения и в итоге на разрядное напряжение, сильно зависят от местных условий и могут изменяться в широких пределах. Поэтому при проектировании внешней изоляции конструкции наружной установки необходим строгий учет атмосферных условий в конкретной заданной области.

Особенность внешней изоляции состоит также в том, что ее электрическая прочность после пробоя или перекрытия и быстрого отключения может через короткое время полностью восстановиться до исходного уровня. Поэтому в редких и особо неблагоприятных условиях можно допускать перекрытие внешней изоляции, а дальнейшую нормальную работу всей установки обеспечивать путем применения АПВ.

Электрическая прочность внутренней изоляции практически не зависит от атмосферных условий. Точнее, на поведение внутренней изоляции не влияют случайные и быстрые колебания температуры и влажности окружающего воздуха, если они не выходят за пределы допустимых значений; влияние оказывают только средние за относительно длительный период времени значения температуры и влажности окружающего воздуха.

Механизм пробоя внутренней изоляции может быть существенно разным при электрических воздействиях разной длительности. Соответственно разными являются и пробивные напряжения. Экспериментально установлено, что для многих видов внутренней изоляции пробивное напряжение при временах воздействия в несколько десятков микросекунд, характерных для грозовых перенапряжений, может в десятки раз превышать пробивные напряжения при воздействиях длительностью в несколько лет, соответствующих воздействию рабочего напряжения.

Полную информацию о внутренней изоляции дают так называемые вольт-временные характеристики — зависимости пробивного напряжения от длительности воздействия в диапазоне от микросекунд до десятков лет. Однако полное определение таких характеристик связано с большими затратами средств и времени. При проектировании внутренней изоляции оборудования энергосистем, в том числе и изоляторов, в соответствии с возможными в эксплуатации видами электрических воздействий пользуются данными:

о кратковременной электрической прочности при грозовых перенапряжениях, которые определяют экспериментально путем приложения к изоляции стандартных импульсов напряжения 1,2/50 (ГОСТ 1516.2-76);

о кратковременной электрической прочности при внутренних перенапряжениях, которые получают экспериментально при приложении стандартных коммутационных импульсов 250/2500 или иной формы или при одномоментном воздействии напряжения промышленной частоты (ГОСТ 1516.2-76);

о длительной электрической прочности как способности изоляции выдерживать непрерывное воздействие рабочего напряжения в течение требуемого срока.

Длительная электрическая прочность внутренней изоляции не может быть непосредственно измерена в лабораторном эксперименте. Ее оценивают косвенным путем, например по результатам измерения характеристик частичных разрядов (ГОСТ 20074-83). Последние являются основной причиной электрического старения внутренней изоляции. Поэтому должно соблюдаться условие отсутствия частичных разрядов при рабочем напряжении. Для некоторых видов внутренней изоляции частичные разряды ограниченной интенсивности допустимы.

При длительном воздействии рабочего напряжения не должно быть теплового пробоя внутренней изоляции. Напряжение теплового пробоя при прочих равных условиях зависит от $\tan \delta$ изоляции, характеризующего диэлектрические потери. Поэтому требование $U_{\text{раб}} < U_{\text{т, проб}}$, где $U_{\text{т, проб}}$ — напряжение теплового пробоя, определяет требование к $\tan \delta$ изоляции.

Для всех видов внутренней изоляции характерны большие разбросы значений кратковременной и длительной электрической прочности; коэффициент вариации может быть 10—15 % и более. Поэтому при проектировании внутренней изоляции пользуются так называемыми допустимыми значениями напряжений или напряженностей, которые соответствуют достаточно малым вероятностям пробоя. Допустимые значения напряжений и напряженностей определяют путем статистической обработки опытных данных, затем их проверяют и уточняют по результатам эксплуатации изоляционных конструкций.

Требования к электрической прочности изоляторов

Изоляторы и изоляционные конструкции должны выдерживать без пробоя или перекрытия возможные в эксплуатации грозовые и внутренние перенапряжения. Конкретные требования к уровню электрической прочности изоляторов и изоляционных конструкций по отношению к перенапряжениям определяются значениями испытательных напряжений. Последние устанавливаются с учетом уровней перенапряжений в сетях разных классов напряжения и нормируются ГОСТ 1516.1-76. Испытательные напряжения изоляторов с нормальной изоляцией, испытываемых отдельно, приведены в табл. 19.1.

В ГОСТ 1516.1-76 указывается, что пробивное напряжение внутренней изоляции изоляторов должно быть больше испытательного напряжения промышленной частоты для внешней изоляции в сухом состоянии не менее чем в 1,2 раза для изоляторов с внутренней жидкой или бумажно-масляной изоляцией и не менее чем в 1,6 раза для остальных изоляторов.

Для изоляторов, входящих в состав трансформаторов, реакторов или аппаратов и испытываемых совместно с ними, используются испытательные напряжения, установленные ГОСТ 1516.1-76 для соответствующего вида оборудования.

Требования к длительной электрической прочности внутренней изоляции изоляторов оп-

Таблица 19.1. Нормированные испытательные напряжения изоляторов с нормальной изоляцией, испытываемых отдельно (от трансформаторов, реакторов и аппаратов), кВ

Класс напряжения оборудования, кВ	Напряжение грозовых импульсов для испытания внешней изоляции					Напряжение коммутационного импульса для испытания внешней изоляции в сухом состоянии и под дождем	Кратковременные напряжения промышленной частоты							
	изоляторов (кроме шинных опор и вводов для нейтрали)		шинных опор		вводов для нейтрали		для испытания внутренней изоляции			для испытания внешней изоляции				
										в сухом состоянии		под дождем		
										изоляторов (кроме вводов)	вводов для трансформаторов, реакторов и аппаратов	вводов для нейтрали	изоляторов (кроме шинных опор и вводов для нейтрали)	шинных опор
3	44	52	42	50	—	—	24	24	—	27	26	—	20	—
6	60	73	57	70	—	—	32	32	—	36	34	—	26	—
10	80	100	75	90	—	—	42	42	—	47	45	—	34	—
15	105	125	100	120	—	—	55	55	—	63	60	—	45	—
20	125	158	120	150	—	—	65	65	—	75	70	—	55	—
24	150	185	140	175	—	—	75	75	—	85	80	—	65	—
27	170	210	160	200	—	—	80	80	—	95	90	—	70	—
35	195	240	185	230	—	—	95	95	—	110	105	—	85	—
110	480	600	460	570	200	—	230	265	130	295	280	135	215	114
150	660	825	630	785	275	—	300	340	180	375	355	195	290	155
220	950	1190	900	1130	400	—	440	490	265	550	520	280	425	215
330	1200	1400	1150	1350	—	950	560	630	—	700	670	—	550	—
500	1600	1950	1600	1950	—	1300	760	800	—	900	900	—	740	—
750	2100	2550	—	—	—	1550	—	800	—	1000	—	—	900	—
1150	2900	3200	—	—	—	2100	1150	1150	—	1300	—	—	1300	—

Примечание. Испытательные напряжения для изоляторов всех классов напряжения, кроме 750 и 1150 кВ, нормированы ГОСТ 1516.1-76; для 750 кВ указаны испытательные напряжения по ГОСТ 20690-75 для силовых трансформаторов.

деляются наибольшим рабочим напряжением и необходимым сроком службы изолятора.

Требования к электрической прочности внешней изоляции изоляторов наружной установки по отношению к рабочему напряжению в условиях загрязнения и увлажнения определяются нормами на удельные, т.е. отнесенные к 1 кВ наибольшего рабочего линейного напряжения, длины пути утечки по поверхности изолятора. Эти нормы, установленные ГОСТ 9920-75 для трех категорий аппаратов и изоляторов, приведены в табл. 19.2. Изоляторы

Таблица 19.2. Удельная длина пути утечки изоляции аппаратов наружной установки (ГОСТ 9920-75)

Категория аппарата	Удельная длина пути утечки, м/кВ (не менее), изоляции аппарата, установленного в системах	
	с заземленной нейтралью	с изолированной нейтралью
А	15,0	17,0
Б	22,5	26,0
В	31,0	35,0

Таблица 19.3. Коэффициент эффективности k для внешней изоляции электрооборудования распределительных устройств

L/H	1,5—2,0	2,0—2,3	2,3—2,7	2,7—3,2	3,2—3,5
k	1,0	1,10	1,20	1,30	1,40

категории А предназначены для работы в «нормальных» условиях по загрязненности атмосферы, изоляторы категории Б — при повышенной загрязненности и изоляторы категории В — при особо загрязненной атмосфере.

Удельные длины пути утечки для изоляторов сетей с изолированной нейтралью должны быть несколько большими, чем для сетей с заземленной нейтралью, так как в сетях с изолированной нейтралью возможна длительная работа с замыканием одной фазы на землю, когда на изоляцию «здоровых» фаз действует линейное напряжение.

Внешняя изоляция изоляторов воздушных линий и открытых распределительных устройств должна соответствовать требованиям Руководящих указаний [19.4]: для нее должно соблюдаться условие

$$L_0 \geq \lambda_0 U,$$

где L_0 — эффективная длина пути утечки по поверхности изолятора; λ_0 — удельная эффективная длина пути утечки, нормированные значения которой приведены в табл. 19.3; U — наибольшее рабочее междофазное напряжение.

Понятие эффективной длины L_0 введено для того, чтобы учесть неравномерность распределения загрязнений по поверхности изолятора и возможность отрыва канала разряда от поверхности изолятора. Эффективная длина L_0 связана с геометрической L длиной утечки соотношением $L_0 = L/k$, где k — коэффициент эффективности, значения которого в зависимости от отношения геометрической длины пути утечки L к строительной длине H изо-

Таблица 19.4. Нормированная удельная эффективная длина пути утечки внешней изоляции электрооборудования ОРУ 35–750 кВ (ПУ Минэнерго СССР)

Степень загрязненности атмосферы	м/МВ (не менее), λ_3 , при номинальном напряжении, кВ	
	35	110–750
I	17,0	15,0
II	17,0	15,0
III	22,5	18,0
IV	26,0	22,5
V	35,0	30,0
VI	40,0	35,0

ляционной конструкции приведены в табл. 19.4.

В принятой в Руководящих указаниях классификации районов по степени загрязненности атмосферы к районам I степени относятся: лес, тундра, лесотундра, болота, луга, удаленные от промышленных и других источников загрязнения. К районам II степени загрязненности атмосферы принадлежат районы с сильно дефлирующими почвами и сельскохозяйственные районы, в которых применяются химические удобрения, гербициды и другие химические вещества, а также промышленные районы с низким уровнем загрязненности атмосферы. Районы III–IV степеней загрязненности — это районы, имеющие источники повышенной загрязненности в виде некоторых промышленных предприятий и тепловых электростанций, участков с засоленной почвой и водоемов с соленой водой. Правила определения степени загрязненности атмосферы с учетом названных источников и их особенностей, а также расстояния от источников загрязнения до места размещения высоковольтного оборудования изложены в Руководящих указаниях.

19.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ТИПОВЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Общие сведения

Практически всю информацию об электрической прочности различных промежутков, составляющих внешнюю и внутреннюю изоляцию изоляторов, а также любых других высоковольтных изоляционных конструкций до сего времени получают опытным путем. Инженерные методы расчета пробивных напряжений имеются только для газовых промежутков, физика разрядных процессов в которых изучена достаточно глубоко. Для внутренней изоляции, состоящей из жидких или твердых диэлектриков или их комбинации, пригодные для практики расчетные методики отсутствуют. Поэтому при проектировании изоляционных конструкций пользуются опытными данными о пробивных напряжениях.

Из-за высокой стоимости экспериментов, требующих разрушения крупных конструкций или макетов, часто возникает необходимость использования уже имеющихся для рассматриваемого вида изоляции данных, но полученных при иных значениях основных параметров (толщине изоляции, размерах электродов и

др.). В таких случаях пользуются следующими приближенными выражениями:

при изменении площади электродов

$$\bar{U}_{пр} \approx \bar{U}_{про} - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma_0 \ln \frac{S}{S_0},$$

где S_0 — площадь электродов у конструкции, для которой имеются данные о среднем пробивном напряжении $\bar{U}_{про}$ и среднеквадратичном отклонении σ_0 ; S — площадь электродов у конструкции, для которой оценивается среднее пробивное напряжение $\bar{U}_{пр}$;

при изменении толщины d изоляции со слабеоднородным электрическим полем

$$U_{пр} \approx U_{про} \frac{d}{d_0} \frac{k_{н0}}{k_n},$$

где $k_{н0}$ — коэффициент неоднородности электрического поля, т.е. отношение наибольшей в промежутке напряженности к средней напряженности, для изоляции при толщине d_0 , для которой известно пробивное напряжение $U_{про}$; k_n — коэффициент неоднородности электрического поля для изоляции при толщине d , для которой оценивается величина пробивного напряжения $U_{пр}$;

при изменении толщины d изоляции с резконеоднородным электрическим полем

$$U_{пр} \approx U_{про} \left(\frac{d}{d_0} \right)^{0,5}.$$

Следует иметь в виду, что приведенные выше соотношения не являются универсальными и точными.

Электрическая прочность внутренней изоляции зависит не только от геометрических размеров, но и от ряда других факторов — режимов изготовления, свойств исходных материалов, условий работы или проведения опытов, методов измерения. По этой причине часто отмечаются значительные расхождения между данными для одной и той же изоляции, изготовленной на разных заводах или в разное время. В связи с этим необходим строгий анализ и отбор имеющихся опытных данных, во всех случаях требуется экспериментальная проверка вновь разработанной изоляционной конструкции.

Приводимые ниже сведения об электрической прочности изоляционных промежутков следует рассматривать как ориентировочные. Более подробные сведения имеются в рекомендуемой литературе.

Газовые промежутки

Для воздушных промежутков с однородным электрическим полем и идеально гладкими электродами пробивное напряжение, кВ, определяется выражением

$$U_{пр} = 24,5\delta l + 6,4 \sqrt{\delta l},$$

где l — расстояние между электродами, см; $\delta = pT_0/p_0T$ — относительная плотность воздуха; p — давление, МПа; T — температура, К; $p_0 = 0,1$ МПа; $T_0 = 293$ К.

Микронеровности на поверхности электродов приводят к снижению величины $U_{пр}$. При высокой чистоте обработки поверхностей элект-

тров, $p < 0,5$ МПа и $l > 1,0$ см снижение $U_{пр}$ составляет не более 10 %.

Начальное напряжение U_0 для воздушного промежутка между соосными цилиндрическими электродами идеальной гладкости равно

$$U_0 = 24,5\delta r_0 \left[1 + \frac{0,65}{(\delta r_0)^{0,38}} \right] \ln \frac{R}{r_0},$$

где r_0 — радиус внутреннего электрода, см; R — радиус наружного электрода, см.

Для резконеоднородных электрических полей напряжение U_0 соответствует напряжению U_k зажигания короны, для слабонеоднородных полей — пробивному $U_{пр}$. Условия, при которых электрическое поле следует относить к слабо- или резконеоднородному, рассматриваются в [19.5]. Там же излагаются методы расчета начальных и разрядных напряжений для других систем электродов и смесей газов, анализируется влияние чистоты обработки поверхностей электродов.

Пробивные напряженности, МВ/м, при частоте 50 Гц и постоянном напряжении для промежутков в виде соосных цилиндров, заполненных элегазом (SF_6 — шестифтористая сера) или азотом под давлением, можно ориентировочно определить по формуле

$$E_{пр} = a (10p)^b \left(1 + \frac{1}{\sqrt{r}} \right),$$

где p — давление, МПа; r — радиус внутреннего цилиндра, см; $a = 2,6$, $b = 0,8$ для элегаза при $p = 0,1 \div 0,75$ МПа и $a = 2,5$, $b = 0,33$ для азота при $p > 0,5$ МПа.

Импульсная пробивная напряженность для промежутка с элегазом или азотом под давлением $E_{имп} = k_{и} E_{пр}$, где $E_{пр}$ — пробивная напряженность при частоте 50 Гц или при постоянном напряжении; $k_{и}$ — коэффициент импульса, который для грозовых импульсов 1,2/50 лежит в пределах 1,5—1,8, а для коммутационных в пределах — 1,05—1,10.

Зависимость относительного пробивного напряжения смеси азота и элегаза от объемного содержания элегаза показана на рис. 19.1.

Следует иметь в виду, что на пробивные напряженности газовых промежутков значи-

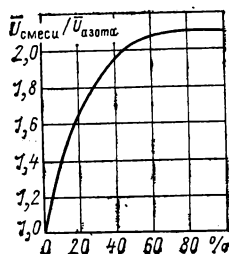


Рис. 19.1. Относительные разрядные напряжения смеси элегаза и азота

тельное влияние оказывают площадь электродов и чистота обработки их поверхностей.

Зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами для воздушных промежутков с резконеоднородным электрическим полем (стержень — стержень, стержень — плоскость) при нормальных условиях (давление 0,1 МПа, температура 293 К, абсолютная влажность 11 г/м³) при напряжениях

с частотой 50 Гц и импульсных приведены на рис. 19.2—19.5. При отклонении условий от нормальных изменение разрядных напряжений определяется с помощью поправок, которые вычисляются по методике, изложенной в ГОСТ 1516.2-76.

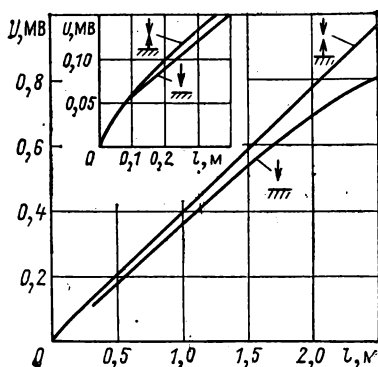


Рис. 19.2. Разрядные напряжения для воздушных промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость при 50 Гц

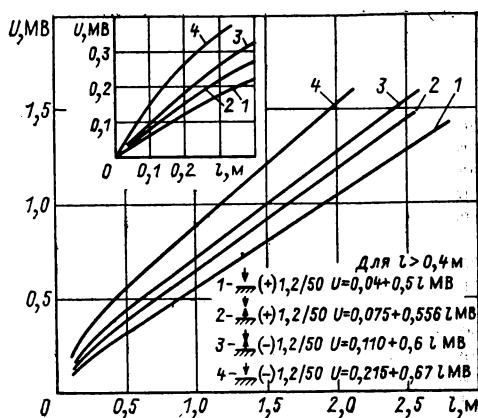


Рис. 19.3. Импульсные разрядные 50 %-ные напряжения для воздушных промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость

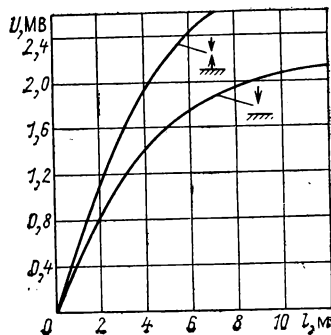


Рис. 19.4. Разрядные напряжения для воздушных промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость при 50 Гц и нормальных атмосферных условиях

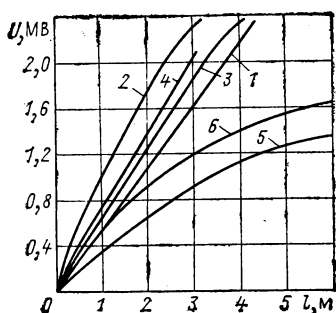


Рис. 19.5. Импульсные разрядные 50 %-ные напряжения для воздушных промежутков при нормальных атмосферных условиях:

1 — импульс 1,2/50, «+» стержень — плоскость; 2 — то же, но «-» стержень — плоскость; 3 — то же, но стержень — стержень при положительной полярности незаземленного стержня; 4 — то же при отрицательной полярности; 5 — при коммутационном импульсе $\tau_{\phi} = 120$ мкс, «+» стержень — плоскость; 6 — то же, но при $\tau_{\phi} = 2500$ мкс

Разрядные характеристики промежутков с резконеоднородными полями, встречающихся в реальных конструкциях, лежат между характеристиками промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость.

Воздушные промежутки вдоль поверхности изолятора

Разрядные напряжения в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика зависят от степени неоднородности электрического поля, расположения поверхности относительно силовых линий поля и состояния поверхности твердого диэлектрика.

В однородном поле, когда силовые линии направлены вдоль чистой и сухой поверхности, средняя разрядная напряженность зависит от гигроскопичности диэлектрика, влажности воздуха и плотности прилегания электродов к диэлектрику. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что в узких щелях между диэлектриком и электродом из-за различия диэлектрических проницаемостей воздуха и твердого диэлектрика напряженность возрастает и при относительно низких напряжениях возникают частичные разряды. Они инициируют развитие разряда по поверхности при более низких напряженностях. Разрядные напряжения могут быть в 3—6 раз ниже, чем для соответствующего чисто воздушного промежутка. Например, при нормальных условиях и расстояниях между электродами более 100 мм средняя разрядная напряженность при частоте 50 Гц по фарфору в воздухе составляет около 0,5 МВ/м.

При резконеоднородном поле с преобладающей нормальной составляющей напряженности (схема изоляции показана на рис. 19.6) при напряжении U_k в узкой области у края электрода возникает коронный разряд. Затем при $U_{ск} > U_k$ от края электрода начинают развиваться скользящие разряды, распространяющиеся на значительную часть разрядного расстояния l_p . С ростом приложенного напряжения длина $l_{ск}$ этих разрядов быстро увеличивается. При напряжении $U_{пер}$, когда $l_{ск}$ достигает l_p , происходит перекрытие.

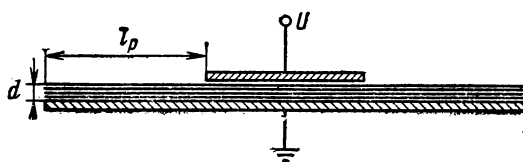


Рис. 19.6. Схема изоляции с резконеоднородным полем и преобладающей нормальной составляющей напряженности

Напряжения U_k и $U_{ск}$, кВ, могут быть определены по формулам

$$U_k = 1,5 \left(\frac{d}{\epsilon_r} \right)^{0,45}; \quad U_{ск} = 26,5 \left(\frac{d}{\epsilon_r} \right)^{0,45}$$

где d — толщина твердого диэлектрика, мм; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость этого диэлектрика.

Длина $l_{ск}$ скользящего разряда пропорциональна пятой степени действующего напряжения. Поэтому $U_{пер}$ мало отличается от напряжения $U_{ск}$; выражением для $U_{ск}$ можно пользоваться для приближенной оценки напряжения перекрытия.

Для цилиндрического конденсатора с острыми краями электродов можно использовать приведенные выше формулы для U_k и $U_{ск}$, однако при этом вместо толщины диэлектрика d следует подставлять величину $d' = R \ln R/r$, где r — радиус внутреннего электрода, R — радиус наружного электрода.

У стержневых и штыревых опорных изоляторов электрическое поле, как правило, получается резконеоднородным с преобладающей тангенциальной составляющей напряженности. При этом разрядные напряжения зависят от конструкции металлической арматуры, формы изоляционного тела, определяющей длину пути разряда в воздухе, и состояния поверхности изолятора. При проектировании изоляторов пользуются разрядными напряжениями, измеренными при сухом состоянии поверхности и при дожде нормированной интенсивности (см. ГОСТ 1516.2-76). При сухом состоянии поверхностей измерения проводятся при напряжениях 50 Гц и импульсном, под дождем — при напряжении 50 Гц.

Влияние смачивания чистой поверхности дождем на разрядное напряжение видно из кривых на рис. 19.7.

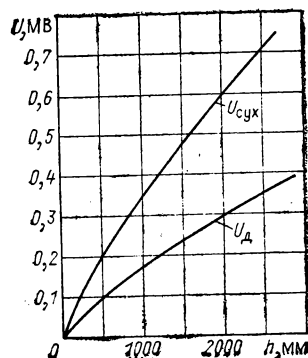


Рис. 19.7. Зависимость разрядного в сухом состоянии $U_{сух}$ и разрядного под дождем U_d напряжений вдоль гладкого без ребер фарфорового стержня от его длины

При расчетах фарфоровых изоляторов используются следующими эмпирическими формулами:

выдерживаемые напряжения, кВ, при 50 Гц в сухом состоянии для изоляторов:

штыревых	$U_c = 15 + 0,395 I_c$
стержневых	$U_c = 24 + 0,378 I_c$
опорных	$U_c = 30 + 0,290 I_c$
проходных	$U_c = (0,33 \div 0,43) I_c$

выдерживаемые напряжения, кВ, при 50 Гц под дождем для изоляторов:

штыревых	$U_d = 0,25 I_c$
стержневых	$U_d = 0,30 I_c$
проходных	$U_d = (0,23 \div 0,26) I_c$

импульсные 50 %-ные разрядные напряжения для изоляторов:

однобоковых шты- ревых	$U_{50} \% = 0,70 I_c$
многобоковых штыревых	$U_{50} \% = 30 + 0,54 I_c$
стержневых	$U_{50} \% = 0,67 I_c$
проходных	$U_{50} \% = (0,52 \div 0,60) I_c$

В этих выражениях для разрядных напряжений I_c — длина пути перекрытия в сухом состоянии, мм, которая ориентировочно определяется как наикратчайшее расстояние по воздуху между высоковольтным и заземленным электродами.

Приведенные выше выражения дают приближенные значения разрядных напряжений,

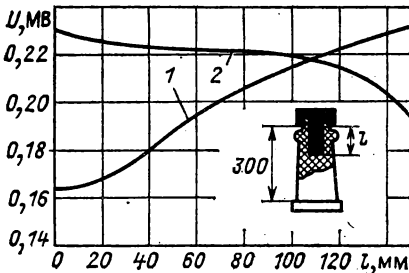


Рис. 19.8. Зависимость 50 %-ного импульсного разрядного напряжения по поверхности опорного изолятора от длины внутреннего электрода:

1 — импульс +1,20/50; 2 — импульс —1,2/50

так как не учитывают строго влияние формы изоляционного тела, конструкции металлической арматуры. Для иллюстрации влияния арматуры на электрическую прочность внешней изоляции изолятора на рис. 19.8 показана зависимость импульсного 50 %-ного разрядного напряжения опорного изолятора от длины внутреннего электрода.

Промежутки в масле вдоль поверхности твердого диэлектрика

В слабонеоднородных полях, если граница раздела масло — твердый диэлектрик совпадает с силовыми линиями, наличие в промежут-

ке твердого диэлектрика практически не влияет на разрядное напряжение. Если же граница раздела пересекает силовые линии, то влияние твердого диэлектрика может быть различным в зависимости от того, как присутствие твердого диэлектрика влияет на напряженность в области, прилегающей к поверхности твердого диэлектрика. Приближенная оценка влияния твердого диэлектрика в таких случаях может быть произведена путем анализа электрического поля, точная — только по результатам экспериментов.

В резконеоднородных полях разряд в масле по поверхности твердого диэлектрика, как и в воздухе, имеет три стадии: начальные частичные разряды малой интенсивности (корона), скользящие разряды, полное перекрытие. Для изоляции конденсаторного типа по схеме рис. 19.6 напряжение $U_{ск}$, кВ, появления скользящих разрядов по поверхности обычно используемых в масле твердых изоляционных материалов (картона, бумаги и др.) определяется по формуле

$$U_{ск} = 13,8d^{0,45},$$

где d — толщина твердой изоляции, мм.

Длина $l_{ск}$, мм, скользящих разрядов при напряжении $U > U_{ск}$

$$l_{ск} = \frac{U - U_{ск}}{1,28},$$

где U — в кВ.

Полное перекрытие разрядного промежутка в масле длиной l_p происходит при напряжении, кВ,

$$U_{пер} = U_{ск} + 1,28 l_p,$$

где l_p — в мм.

Формула справедлива для $l_p > 50$ мм.

Бумажно-масляная изоляция

Бумажно-масляная изоляция (БМИ) является основной внутренней изоляцией во вводах на напряжения 110—750 кВ. Характеристики БМИ зависят от ее структуры, т. е. от взаимного расположения лент или полос бумаги в слоях, от качества бумаги и масла, а также от технологии изготовления: плотности намотки бумажного остова, режимов вакуумной сушки и пропитки маслом.

В вводах на напряжение 110—750 кВ непременно используется регулирование электрического поля в БМИ с помощью дополнительных электродов — алюминиевых обкладок, закладываемых в бумажный остов при намотке. Эти обкладки образуют систему последовательно соединенных конденсаторов и разделяют БМИ на ряд относительно тонких слоев. БМИ в слое на участках, прилегающих к краям обкладок, работает в резконеоднородном поле (БМИ конденсаторного типа), в остальной части — в слабонеоднородном поле.

Для БМИ конденсаторного типа допустимые рабочие и испытательные напряженности выбираются исходя из следующих условий:

отсутствия при рабочем напряжении начальных частичных разрядов, медленно разлагающих масло и ограничивающих срок службы изоляции;

отсутствия при испытательном напряжении 50 Гц критических разрядов, способных за короткое время испытания необратимо повредить изоляцию;

отсутствия при импульсных испытательных напряжениях пробоев или перекрытий по уступу (от края обкладки вдоль слоев бумаги) между обкладками.

При проектировании вводов для БМИ конденсаторного типа принимаются следующие средние по толщине допустимые напряженности:

испытательные импульсные 1,2/50....	$E_{имп, доп} = 40 d^{-0,5}$ МВ/м, но не более 40 МВ/м;
испытательные при частоте 50 Гц....	$E_{исп, доп} = 12 d^{-0,58}$ МВ/м, но не более 12 МВ/м;
рабочие....	$E_{раб, доп} = 4,0 d^{-0,58}$ МВ/м, но не более 4,0 МВ/м.

Здесь d — толщина слоя БМИ между обкладками, мм.

Средние по длине уступа допустимые напряженности (вдоль слоев бумаги) принимаются равными:

испытательные при частоте 50 Гц	0,8—1,0 МВ/м
испытательные при импульсах 1,2/50	1,8—2,0 МВ/м
испытательные при коммутационных импульсах	1,5—1,7 МВ/м

Электрическая прочность фарфоровых изделий

Пробивные напряженности изоляционных изделий из фарфора существенно ниже тех, которые получают при испытаниях стандартных образцов малой толщины (28—30 МВ/м). Объясняется это особенностями технологии, приводящими к увеличению неоднородностей в фарфоре с ростом толщины его стенок. При расчетах изоляционных изделий в виде полых

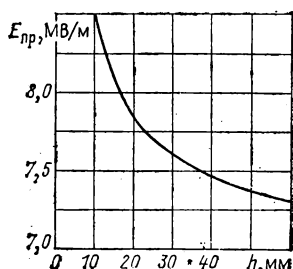


Рис. 19.9. Зависимость пробивной напряженности фарфорового цилиндра от толщины его стенки

цилиндров значение пробивной напряженности, МВ/м, для высоковольтного фарфора можно определить по рис. 19.9 или по формуле

$$E_{пр} = 6,5 + 62h^{-0,5},$$

где h — толщина стенки фарфорового цилиндра, мм.

При нагреве выше 120 °С электрическая прочность фарфора определяется тепловым пробоем, пробивная напряженность резко снижается с ростом температуры.

19.3. РАСЧЕТЫ ИЗОЛЯТОРОВ

Общие сведения

При проектировании изоляторов выполняются механические, электрические и тепловые расчеты с целью выбора оптимальной конструкции, удовлетворяющей всему набору требований. Для сложных изоляционных конструкций, какими являются изоляторы для высших классов напряжения, расчеты проводят для большого числа узлов и деталей, выполняющих как основные, так и вспомогательные функции в конструкции. При этом пользуются расчетными методиками и нормами, разработанными с учетом особенностей конструкции и технологии изготовления изолятора данного типа. В связи с большим разнообразием изоляционных конструкций, используемых в установках и аппаратах классов от 3 до 750 кВ, существует и много частных расчетных методов, основу которых составляют общие методы расчета электрических полей, механических напряженностей, стационарных и нестационарных процессов теплопередачи.

Многие задачи, возникающие при разработке новых изоляционных конструкций, особенно высших классов напряжения, решаются численными методами с помощью ЭВМ. К их числу относятся, например, задачи выбора оптимальных форм и размеров экранов, регулирующих электрическое поле конструкции.

Следует отметить, что обязательным этапом разработки новой изоляционной конструкции является экспериментальная проверка принятых решений. Для этого опытные образцы подвергают высоковольтным и механическим испытаниям в разных условиях; образцы изоляторов наружной установки продувают в аэродинамических трубах.

Расчет электрических полей

На всех участках внешней и внутренней изоляции изоляционной конструкции должны соблюдаться условия $E_{раб, нб} \leq E_{раб, доп}$; $E_{исп, нб} \leq E_{исп, доп}$, где $E_{раб, нб}$ и $E_{исп, нб}$ — наибольшие напряженности электрического поля при воздействии рабочего и испытательного напряжений; $E_{раб, доп}$ и $E_{исп, доп}$ — соответствующие допустимые значения напряженностей, определяемые для каждого вида изоляции по экспериментальным данным.

Расчеты электрических полей проводятся для выбора изоляционных расстояний, форм и размеров электродов, при которых соблюдаются указанные выше условия достаточной электрической прочности и выполняются другие требования, предъявляемые ко всей конструкции в целом (механическая прочность, экономические показатели и т. д.).

Расчет электрических полей аналитическими методами возможен только в ограниченном числе случаев [19.10; 19.11]. Для изоляционных конструкций с электродами сложной конфигурации наиболее эффективными являются численные методы, реализуемые с помощью ЭВМ. Подробный обзор этих методов приведен в [19.7].

Для расчетов полей изоляционных конструкций наиболее удобны метод интегральных уравнений и метод эквивалентных зарядов,

так как они позволяют с большей точностью и при меньших затратах машинного времени вычислить значения напряженностей на поверхностях электродов, т. е. наибольшие напряженности в конструкции.

Чтобы пояснить сущность метода интегральных уравнений, рассмотрим следующую задачу. В однородной среде с абсолютной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r$ находится уединенный проводник (рис. 19.10). По-

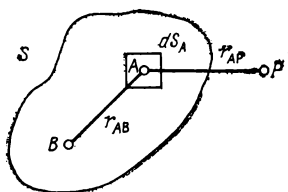


Рис. 19.10. К расчету электрического поля методом интегральных уравнений

тенциал на его поверхности равен V_0 . Потенциал в произвольной точке P вне проводника будет равен

$$V_P = \frac{1}{4\pi\epsilon_a} \int_S \frac{\sigma_A dS_A}{r_{AP}}, \quad (1)$$

где σ_A — поверхностная плотность заряда в точке A , находящейся на поверхности проводника; r_{AP} — расстояние от точки A до точки P .

Если взять точку на поверхности проводника (на рис. 19.10 точка B), то потенциал в ней будет удовлетворять равенству

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_a} \int_S \frac{\sigma_A dS_A}{r_{AB}} = V_0. \quad (2)$$

Уравнение (2) является интегральным уравнением I рода электростатической задачи. Для его решения необходимо найти закон распределения поверхностной плотности заряда σ по поверхности S проводника, обеспечивающий постоянное значение потенциала во всех точках поверхности S .

Если значение поверхностной плотности заряда на проводнике определено, то потенциал в любой точке P вычисляется по (1), а составляющая напряженности по произвольному направлению $\vec{n}$ равна

$$E_{Pn} = \frac{1}{4\pi\epsilon_a} \int_S \frac{\sigma_A \cos(\vec{n}, \vec{r}_{AP})}{r_{AP}^2} dS_A. \quad (3)$$

На поверхности проводника напряженность электрического поля определяется поверхностной плотностью заряда:

$$E_A = \sigma_A / \epsilon_a. \quad (4)$$

Таким образом, решив уравнение (2) относительно σ , далее по формулам (1), (3) и (4) можно найти потенциал и напряженность в любой точке рассматриваемого электрического поля.

Численный метод решения уравнения (2) состоит в том, что оно сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных значений поверхностной плотности заряда.

Для решения уравнения (2) поверхность проводника разбивают на N площадок, внутри каждой из которых помещают расчетную точку. Поверхностная плотность заряда в k -й расчетной точке равна σ_k . Если принять, что в пределах k -й площадки $\sigma_k = \text{const}$, и вычислить потенциал в k -й расчетной точке от всех зарядов на поверхности, то получим

$$\Phi_k = V_0 = \sum_{i=1}^N \sigma_i \alpha_{ik}, \quad (5)$$

где α_{ik} — коэффициент пропорциональности между зарядом σ_i на i -й площадке и потенциалом в k -й точке, созданным этим зарядом.

Записав уравнение (5) для всех расчетных точек поверхности, получим систему алгебраических уравнений, каждое из которых отражает тот факт, что потенциал в данной расчетной точке, созданный всеми поверхностными зарядами, равен заданному потенциалу проводника.

Для расчета плоского или плоскомеридионального поля в однородной среде обычно достаточно число расчетных точек составляет несколько десятков.

Расчет электрического поля системы из n проводников при заданных потенциалах проводится путем решения системы интегральных уравнений

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_a} \int_{S_i} \frac{\sigma_{Ai} dS_i}{r_{Ai} B_i} = V_j; \quad (6)$$

$j = 1, 2, \dots, n.$

Система уравнений (6) при численном решении также сводится к системе линейных алгебраических уравнений.

Численное решение систем интегральных уравнений осуществляется на ЭВМ. Схема программы приведена на рис. 19.11. Тексты программ для расчета плоскомеридиональных полей на языке ФОРТРАН приведены в [19.7 — 19.9]. Погрешность расчета напряженностей не превышает 1 %.

Расчет электрических полей при наличии нескольких диэлектриков с различными ди-

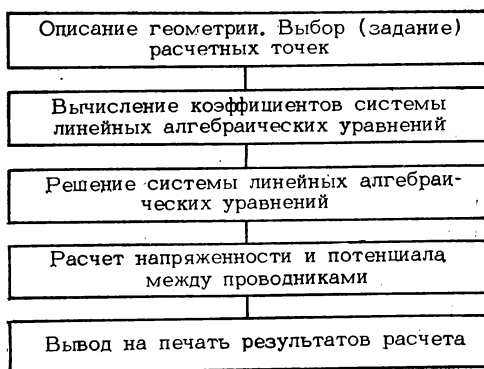


Рис. 19.11. Схема программы расчета электрического поля на ЭВМ

электрическими проницаемостями также можно проводить, используя метод интегральных уравнений. С этой целью неоднородная среда заменяется однородной, в которой на границах раздела диэлектриков вводятся слои фиктивных зарядов. При этом получается смешанная система интегральных уравнений, численный метод решения которой также состоит в сведении ее к системе линейных алгебраических уравнений. Схема программы при этом имеет тот же вид, что и при расчете поля в однородной среде.

Для расчетов электрического поля в однородной среде может быть также использован метод эквивалентных зарядов. Он состоит в том, что внутри проводника выбирается некоторая система зарядов, например точечных, кольцевых, линейных. Далее записывается условие того, что потенциал, созданный этими зарядами в конечном числе точек на поверхности проводника, равен заданному. Эти условия составляют систему линейных алгебраических уравнений относительно зарядов.

Решив указанную систему уравнений и определив эквивалентные заряды, далее можно рассчитать потенциал и напряженность вне проводника в любой точке поля как сумму потенциалов или напряженностей от всех эквивалентных зарядов.

Расчет механической прочности изоляторов

Для опорных и проходных изоляторов расчет обычно ведут по условию механической прочности на изгиб: $M_{изг} < \sigma_{и} W$, где $M_{изг}$ — расчетный изгибающий момент, действующий на изолятор, Н·м; $\sigma_{и}$ — разрушающее механическое напряжение на изгиб для материала изолятора, Па; W — момент сопротивления в опасном сечении изолятора, м³.

Для изолятора в виде сплошного цилиндра

$$W = \frac{\pi D^3}{32} \approx 0,1 D^3;$$

для изолятора в виде полого цилиндра

$$W = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D},$$

где D и d — наружный и внутренний диаметры тела изолятора в опасном сечении.

При расчете фарфоровых изоляторов необходимо учитывать зависимость разрушающей напряженности $\sigma_{и}$ на изгиб от площади поперечного сечения фарфора. Значения $\sigma_{и}$, МПа, можно определить по формулам:

для неармированного фарфора $\sigma_{и} = 2,43S^{-0,38}$,

для армированного фарфора с цементной заделкой $\sigma_{и} = 1,07S^{-0,42}$,

где S — площадь поперечного сечения фарфора в опасном сечении, м².

Цель расчета — определение необходимых по условиям механической прочности изолятора размеров D и d в опасном сечении.

Расчет опорного изолятора

Задаются: номинальное напряжение $U_{ном}$, расчетное механическое усилие F на изолятор

и условия работы (внутренней или наружной установки, категория исполнения).

Выбирается: конструктивная схема изолятора.

Расчет ведется в следующей последовательности.

1. Расчетные выдерживаемые напряжения внешней изоляции в сухом состоянии принимаются на 10—20 % выше соответствующих испытательных напряжений 50 Гц и импульсного (см. табл. 19.1).

2. Определяется активная изоляционная высота $l_{акт}$ изолятора, равная полной его высоте за вычетом аксиальных размеров металлической арматуры. Величину $l_{акт}$ определяют по принятым значениям выдерживаемых напряжений в сухом состоянии и разрядным характеристикам воздушных промежутков вдоль поверхности изолятора (§ 19.2).

3. На изоляционном теле изолятора внутренней установки предусматривают ребра по рис. 19.12: одно для напряжений 6—10 кВ в верхней части; 2—3 для напряжений 15—20 кВ и 3—5 для 35 кВ.

У изоляторов наружной установки ребра выполняют по рис. 19.13. Число ребер ориентировочно $n = 1,5 + 0,06 U_{ном}$, где $U_{ном}$ — номинальное напряжение, кВ. Вылет ребра A принимается равным половине промежутка между ребрами.

4. Для изоляторов наружной установки по результатам предыдущих расчетов строят очертания поверхности изоляционного тела и определяют длину l_c пути перекрытия в сухом состоянии и длину L пути утечки по поверхности. По l_c и данным, приведенным в § 19.2, проверяют способность изолятора выдерживать испытательное напряжение под дождем. По L определяют удельную длину пути утечки λ ,

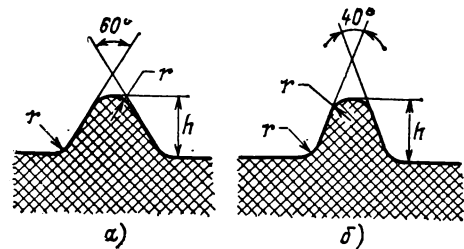


Рис. 19.12. Формы и размеры ребер для изоляторов внутренней установки:

а — $h < 20$ мм, $r = 6$ мм; б — $h > 20$ мм, $r = 10 \div 14$ мм

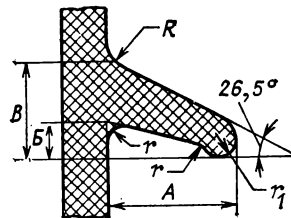


Рис. 19.13. Форма и размеры ребер для изоляторов наружной установки:

$A = 30 \div 75$ мм; $B = (0,25 \div 0,30)$ А; $B_1 = (0,75 \div 0,85)$ А; $r = 5 \div 8$ мм; $r_1 = 10 \div 15$ мм; $R = 15 \div 24$ мм

Из (10) следует, что минимум $E_{гнб}$ достигается при $\xi=3,6$. В этом случае

$$E_{гнб} = 1,8 \frac{U_{расч}}{r_m} = 0,5 \frac{U_{расч}}{r_c}.$$

Установлено, что остов имеет минимальный объем при $\xi=4,1$.

Цель электрического расчета ввода — определение геометрических размеров фарфоровых покрышек и изоляционного остова, количества и размеров обкладок в остова, при которых обеспечивается необходимая электрическая прочность внешней и внутренней изоляции ввода.

Задаются: номинальное напряжение и номинальный ток ввода.

Расчет проводится в следующей последовательности.

1. Определение аксиальных размеров. Высота верхней фарфоровой покрышки H_v определяется из условия отсутствия перекрытия в воздухе по поверхности покрышки при расчетном напряжении

$$H_v \geq U_{расч}/E_{выд,в}.$$

В качестве расчетного напряжения $U_{расч}$ принимается испытательное напряжение U_0 промышленной частоты для внешней изоляции в сухом состоянии (см. табл. 19.1). Выдерживаемая напряженность $E_{выд,в}=0,30+0,33$ МВ/м (наибольшие значения используются при расчетах вводов 110 кВ, наименьшие — при расчетах вводов высших классов напряжений).

Размер h_n определяется по условию отсутствия перекрытия в масле по поверхности нижнего конуса изоляционного остова при расчетном напряжении:

$$h_n \geq U_{расч}/E_{выд,н}.$$

Здесь расчетное напряжение $U_{расч}$ принимается равным одноминутному испытательному напряжению промышленной частоты для внутренней изоляции ввода (см. табл. 19.1). Выдерживаемая напряженность в масле вдоль поверхности остова

$$E_{выд,н} = 0,80 \div 0,60 \text{ МВ/м.}$$

Остальные аксиальные размеры определяются по выражениям $h_b=0,75H_v$; $H_n=h_v/0,75$; $h_m=l_m=h_v+h_n/(\xi-1)$; $l_c=\xi l_m$.

Количество и размеры ребер по рис. 19.13 на поверхности верхней покрышки определяются так же, как и при расчете опорного изолятора.

2. Определение радиальных размеров, количества и размеров обкладок. Наружный радиус r_c стержня выбирается из условия отсутствия в слое с наибольшей радиальной напряженностью $E_{гнб}$ начальных и критических разрядов соответственно при наибольшем рабочем и одноминутном испытательном напряжениях: $E_{гнб} \leq E_{доп}$. С учетом (10)

$$r_c \geq \frac{U_{расч}(\xi+1)}{2\xi E_{доп} \ln \xi}.$$

В качестве расчетного напряжения $U_{расч}$ для вводов на напряжение до 220 кВ включительно принимается одноминутное испытательное напряжение 50 Гц для внутренней изоля-

ции (см. табл. 19.1), а для вводов 330 кВ и выше — наибольшее рабочее (фазное). Соответственно для вводов до 220 кВ включительно допустимая испытательная напряженность определяется выражением

$$E_{исп,доп} = 12,0 \Delta_{нм}^{-0,58},$$

а для вводов 330 кВ и выше — допустимая рабочая напряженность

$$E_{раб,доп} = 4,0 \Delta_{нм}^{-0,58},$$

где $\Delta_{нм}$ — наименьшая толщина слоя изоляции между обкладками, мм; принимается равной 2—4 мм.

Радиус последней, т. е. m -й, обкладки $r_m = \xi r_c$.

Число обкладок в изоляционном остова определяется из условия $m \geq U_{расч}/\Delta_{нм} E_{доп}$, где значения расчетного напряжения и допустимой напряженности выбираются так же, как и при расчете радиуса r_c стержня.

Радиусы остальных обкладок с учетом (7) и постоянства длин уступов λ_n и λ_v подсчитываются по выражению

$$r_i = r_c \xi^{\alpha_i};$$

$$\alpha_i = \frac{\left(2 - \frac{i}{m}\right) \xi + \frac{i}{m}}{\xi + 1} \frac{i}{m},$$

где i — номер обкладки ($i=0$ соответствует центральному стержню). Полученные значения r_i следует округлить до значений, кратных 0,25 мм (толщина одного слоя бумаги, наматанной вполнахлеста).

Длины обкладок определяются по формуле

$$l_i = l_c \left(1 - \frac{\xi - 1}{\xi} \frac{i}{m}\right).$$

19.4. ИЗОЛЯТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

50 Гц

Назначение и классификация изоляторов

По условиям эксплуатации изоляторы подразделяются на конструкции для работы в помещении (для внутренней установки) и для работы на открытом воздухе (для наружной установки).

В климатическом исполнении изоляторы изготавливают по ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70 для районов умеренного (У), холодного (ХЛ) и тропического (Т) климата.

Категории размещения изоляторов для работы в помещении — 2, 3, а для работы на открытом воздухе — 1. В зависимости от районов с различной степенью загрязненности последние выпускают с нормальной (категория А), усиленной (Б) и особо усиленной (В) внешней изоляцией, различающейся длинами пути утечки (см. табл. 19.2) при прочих равных условиях.

По своему назначению изоляторы подразделяются на опорные, проходные и линейные с нормированными соответствующим стандартом электрическими и механическими нагрузками.

Таблица 19.5. Классификация изоляторов

По назначению	По конструктивному исполнению	
	для работы в помещении	для работы на открытом воздухе
Опорные	1. С гладкой поверхностью 2. С ребристой поверхностью	1. Штыревые 2. Стержневые
Проходные	1. С токоведущими шинами 2. Без токопроводов	Для наружно-внутренней установки с нормальной и усиленной изоляцией
Высоковольтные вводы	—	1. Герметичного исполнения 2. Негерметичного исполнения
Линейные	—	1. Штыревые 2. Тарельчатые 3. Стержневые

Каждый тип изолятора имеет разновидности, различающиеся по конструктивному исполнению, техническим характеристикам и условиям эксплуатации.

Для каждого класса напряжения однотипные изоляторы изготовляют на различные механические нагрузки. Классификация изоляторов приведена в табл. 19.5.

Приведенные ниже электрические характеристики изоляторов соответствуют их установке на высоте не более 1000 м над уровнем моря. При эксплуатации изоляторов на высоте более 1000 м и при температуре выше 40 °С следует руководствоваться ГОСТ 1516.1-76 и ГОСТ 1516.2-76.

Опорные изоляторы

Опорные изоляторы предназначены для изоляции и крепления токоведущих частей в электрических аппаратах, распределительных устройствах электрических станций и подстанций и комплектных распределительных устройствах.

Опорные изоляторы для работы в помещении изготовляют по ГОСТ 15131-77 на номинальные напряжения 6, 10, 20 и 35 кВ переменного тока частотой 50 и 60 Гц. Минимальная механическая прочность на изгиб (разрыв) должна соответствовать следующему ряду: 375, 750, 1250, 2000, 3000, 4250 и 6000 даН (1 даН=10 Н).

Климатическое исполнение опорных изоляторов У, УХЛ, Т, категорий размещения 2 и 3.

Промышленность выпускает конструкции опорных изоляторов с внутренней заделкой арматуры, которая благодаря меньшей материалоемкости заменила конструкции изоляторов с наружной и комбинированной заделкой арматуры.

Изоляционная деталь изолятора из электротехнического фарфора (рис. 19.16) представляет собой тело вращения примерно кони-

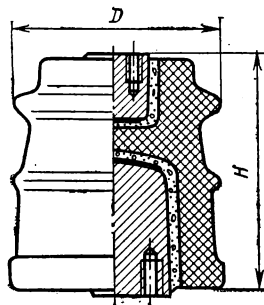


Рис. 19.16. Опорный изолятор с внутренней заделкой арматуры

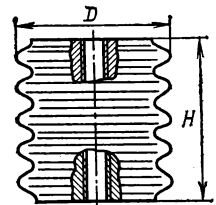


Рис. 19.17. Опорный изолятор с ребристой поверхностью

ческой формы с верхней и нижней полостями, внутрь которых заделана металлическая арматура. На торцевых поверхностях арматуры имеются резьбовые отверстия для крепления шин и монтажа изолятора. Для повышения разрядных напряжений изолятора на боковой поверхности имеется одно (для $U_{ном}=6÷10$ кВ), два (20 кВ) или три (35 кВ) небольших ребра [19.1].

Между металлической арматурой и телом изолятора помещаются прокладки из картона (ГОСТ 9347-74) или паронита (ГОСТ 481-80) для изоляторов исполнения У, ХЛ. Для изоляторов исполнения Т прокладки обрабатываются антисептиками (ГОСТ 15963-79).

Арматуру изоляторов изготовляют из чугуна (ГОСТ 1412-79), алюминиевого сплава (ГОСТ 2685-75) или арматурной стали (ГОСТ 5781-82).

Армирование изоляторов исполнений У и Т производят цементным раствором с применением портландцемента марки 400 (ГОСТ 9835-77, ГОСТ 10178-76).

Армирование изоляторов исполнения ХЛ производят в соответствии с требованиями ГОСТ 17412-72. Толщина цементного шва составляет 2 мм. Соприкасаемые с цементным раствором поверхности арматуры покрывают тонким слоем компенсирующей промазки (ГОСТ 8017-74, ГОСТ 5631-79).

Арматуру изоляторов и швы армирующих связей покрывают влагостойким покрытием (ГОСТ 17412-72, ГОСТ 9.401-79).

Для помещений с повышенной влажностью и загрязненностью воздуха применяют конструкцию опорного изолятора с ребристой поверхностью (рис. 19.17).

Технические характеристики опорных изоляторов приведены в табл. 19.6 (ГОСТ 19797-80).

В условном обозначении типов изоляторов буквы и цифры означают: И — изолятор; О — опорный; Р — ребристый; первая цифра — номинальное напряжение, кВ; вторая — минимальное разрушающее усилие на изгиб, даН; I (II или III) — исполнение; У, УХЛ, Т — климатическое исполнение; 2, 3 — категории размещения. Срок службы изоляторов — не менее 20 лет при интенсивности отказов не более $6 \cdot 10^{-7}$ ч⁻¹.

Опорные изоляторы для работы на открытом воздухе предназначены для изоляции и крепления токоведущих частей в электрических

Таблица 19.6. Технические данные опорных изоляторов для работы в помещении

Тип изолятора	№ рисунка	Номинальное напряжение, кВ	Минимальное разрушающее усилие на изгиб, даН	Основные размеры, мм		Масса изолятора, кг	Цена, руб.
				<i>H</i>	<i>D</i>		
ИОР-6-375 УХЛ, Т2	19.17	6	375	100	84	1,1	0,90
ИО-6-375-11 УЗ	19.16	6	375	100	77	1,1	0,65
ИО-10-375-1 УЗ	19.16	10	375	120	82	1,5	0,8
ИОР-10-375 УХЛ, Т2	19.17	10	375	120	96	1,6	0,85
ИОР-10-750-11 УХЛ, Т2	19.17	10	750	120	112	3,0	2,70
ИО-10-750 УЗ	19.16	10	750	120	102	2,0	2,05
ИОР-10-750-111 УХЛ, Т2	19.17	10	750	120	114	3,1	3,10
ИО-10-2000 УЗ	19.16	10	2000	134	160	5,7	3,10
ИОР-10-2000 УХЛ, Т2	19.17	10	2000	134	170	6,4	4,70
ИОР-10-3000 УХЛ, Т2	19.17	10	3000	150	200	13,2	10,9
ИО-20-375 УЗ	19.16	20	375	210	110	4,2	2,10
ИОР-20-750 У, Т3	19.17	20	750	160	160	5,7	3,85
ИО-20-3000 УЗ	19.16	20	3000	206	186	13,2	6,60
ИОР-20-3000 УХЛ, Т2	19.17	20	3000	206	206	15,0	10,60
ИОР-35-375 УХЛ, Т2	19.17	35	375	372	148	10,6	6,70
ИО-35-375 УЗ	19.16	35	375	372	110	7,1	3,35
ИОР-35-750 УХЛ, Т2	19.17	35	750	372	148	11,5	10,3
ИО-35-750 УЗ	19.16	35	750	372	140	10,5	5,40

аппаратах наружных установок и распределительных устройствах.

Опорно-штыревые изоляторы для работы на открытом воздухе выпускаются на классы напряжения 6, 10, 20 и 35 кВ с минимальной разрушающей нагрузкой на изгиб 3,5; 5; 10 и 20 кН. Климатическое исполнение изоляторов УХЛ, категории размещения I (ГОСТ 8608-79).

Каждому классу напряжения могут соответствовать изоляторы нескольких исполнений, отличающихся конструкцией, электрическими характеристиками и длиной пути утечки по ГОСТ 9920-75.

Конструкция изолятора состоит из изоляционного тела, армированного верхней арматурой — колпачком изолятора, имеющем на торце резьбовые отверстия, и нижней арматурой — штырем изолятора, на котором предусмотрены отверстия для монтажа.

Тело изолятора из электротехнического фарфора на классы напряжения 6—10 кВ выполняется одноэлементным (рис. 19.18), на напряжение 20 и 35 кВ — двух- и трехэлементным (рис. 19.19).

Соединение фарфоровых элементов между собой и с металлической арматурой осуществляется цементно-песчаной связкой.

Обозначение опорно-штыревых изоляторов включает в себя: О — опорный; Н — наружной установки; Ш — штыревой; первая цифра — номинальное напряжение, кВ; вторая цифра — механическая прочность на изгиб, кН; третья — категория исполнения.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ за первый год эксплуатации — 0,9975; по истечении гарантийного срока (3 года) — 0,9935. Срок службы изоляторов 30 лет. В пределах этого срока $P(t) = 0,9935 - 0,0014(t-3)$.

Конструкция опорно-штыревых изоляторов присущ ряд недостатков: чрезмерные размеры, особенно диаметра D , что обуславливает большую материалоемкость конструкции; технологические трудности армирования двух и трехэлементных изоляторов: различные емкости фарфоровых элементов, что приводит к неравномерному распределению напряжения по элементам и увеличению вероятности пробоя изолятора.

Опорно-стержневые изоляторы для наружной установки состоят из сплошного фарфорового цилиндра с развитой боковой поверхностью, армированного верхним и нижним металлическими фланцами (рис. 19.20). Ввиду того что длина разрядного промежутка практически совпадает со строительной высотой изолятора, такие конструкции принято называть непробиваемыми.

Опорно-стержневые изоляторы выпускают по ГОСТ 9984-79 и ГОСТ 25073-81 на номинальные напряжения 10, 20, 35, 110 кВ исполнения УХЛ, Т, категории размещения I. Минимальная разрушающая сила на изгиб состав-

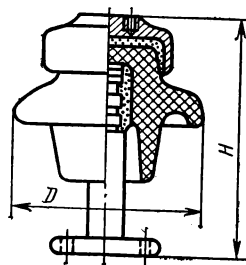


Рис. 19.18. Опорно-штыревой изолятор наружной установки на 6—10 кВ

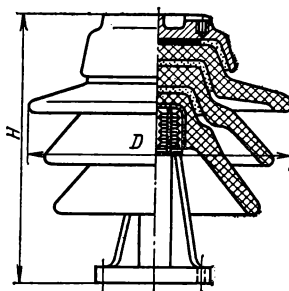


Рис. 19.19. Опорно-штыревой изолятор наружной установки на 35 кВ

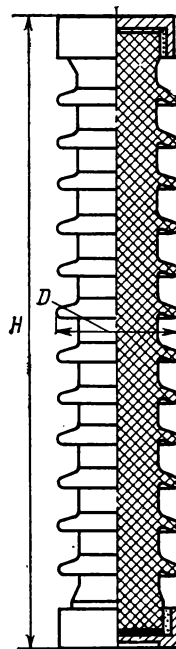


Рис. 19.20. Опорно-стержневой изолятор наружной установки на 110 кВ

Таблица 19.7. Технические данные опорных изоляторов для работы на открытом воздухе

Тип изолятора	Класс напряже- ния, кВ	Механичес- кая проч- ность на изгиб, Н	Размеры, мм		Длина пути утечки, см	Масса, кг	Цена, руб.
			Н	Д			
Опорно-штыревые изоляторы (рис. 19.18 и 19.19)							
ОНШ-6-300-1	6	3430	170	140	19,0	2,3	2,5
ОНШ-10-500-1	10	4900	190	160	22,5	4,1	2,95
ОНШ-10-2000-1	10	19 600	190	250	31,0	12,7	5,10
ОНШ-20-1000-1	20	9800	280	310	68,0	24,8	13,7
ОНШ-35-1000-1	35	9800	400	370	69,0	32,6	16,0
ОНШ-35-2000-1	35	19 600	400	460	81,0	41,5	23,0
Опорно-стержневые изоляторы (рис. 19.20)							
ИОС-10-300-01 Т1	10	3000	302	150	40	9,3	7,20
ИОС-10-300-02УХЛ I	10	3000	295	150	40	9,3	7,20
ИОС-10-500 УХЛ, Т1	10	5000	190	140	20	4,2	5,20
ИОС-10-2000 УХЛ, Т1	10	20 000	284	185	40	26	12,60
ИОС-20-500-01 УХЛ, Т1	20	5000	315	150	40	4,4	6,60
ИОС-20-2000 УХЛ, Т1	20	20 000	355	200	40	22,5	11,40
ИОС-35-500-01 УХЛ, Т1	35	5000	440	175	70	16,0	9,30
ИОС-35-500-02 УХЛ, Т1	35	5000	440	175	70	16,0	9,30
ИОС-35-500-03 УХЛ, Т1	35	5000	570	214	105	34,4	18,0
ИОС-35-2000 УХЛ, Т1	35	20 000	500	235	70	43,5	26,5
ИОС-110-400 УХЛ, Т1	110	4000	1050	220	190	61,0	31,5
ИОС-110-600 УХЛ, Т1	110	6000	1100	225	223	71,0	40,0
ИОС-110-1000 УХЛ, Т1	110	10 000	1100	230	190	79,4	46,50
ИОС-110-1250 УХЛ, Т1	110	12 500	1100	230	190	84,4	70,0
ИОС-110-1500 УХЛ, Т1	110	15 000	1100	245	190	94,3	75,0
ИОС-110-2000 УХЛ, Т1	110	16 000	1100	230	190	106	67,0

Таблица 19.8. Технические характеристики колонок из опорных изоляторов для работы на открытом воздухе

Типы изоляторов и их количество в колонке	Класс напряжения, кВ	Длина пути утечки, см	Механическая прочность, Н	Высота колонки, см	Масса, кг
3ХОНШ-35-1000-1	110	207	3185	120	97,8
3ХОНШ-35-2000-1	110	243	4900	120	124,5
4ХОНШ-35-2000-1	154	324	3185	160	166,0
5ХОНШ-35-2000-1	220	405	2450	200	207,5
ИОС-110-1000+ИОС-110-600 УХЛ, Т1	220	413	2960	210	150,4
5ХИОС-110-600 УХЛ, Т1	500	1115	1470	550	397,0

ляет 300, 400, 500, 600, 1000, 1250, 1500, 1600, 2000 даН. Конструктивное исполнение изоляторов 01, 02, 03.

Срок службы изоляторов — не менее 25 лет.

Опорно-стержневые изоляторы обозначаются таким образом: три буквы: И — изолятор; О — опорный; С — стержневой; первая цифра — U_n , кВ; вторая — изгибающая сила, даН; третья — конструктивное исполнение, далее — как у опорно-штыревых изоляторов.

Армирование опорных изоляторов для наружной установки производится с помощью цементно-песчаной связки с применением порландцемента марки не ниже 500 (ГОСТ 10178-76). Толщина шва лежит в пределах от 2 до 22 мм. Компенсирующие промазки толщиной не менее 0,1 мм применяются из растворов битума (ГОСТ 6617-76, ГОСТ 8017-74).

Арматура и швы изоляторов покрываются влагостойким покрытием для категории УХЛ по ГОСТ 13276-79 и ГОСТ 17412-72, а для категории Т — по ГОСТ 15963-79.

Изоляционные прокладки для штыревых изоляторов изготовляют из прессованной пробки, для стержневых — из картона или паронита (ГОСТ 9347-74, ГОСТ 481-80).

Для арматуры изоляторов используют серый (ГОСТ 1412-79), ковкий (ГОСТ 1215-79), высокопрочный (ГОСТ 7293-79) чугун или сталь Ст25Л-1 (ГОСТ 977-75).

Технические характеристики опорно-штыревых и опорно-стержневых изоляторов приведены в табл. 19.7.

На электрических станциях и подстанциях на более высокий класс напряжения собирают вертикальные колонки из изоляторов меньшего класса напряжения. Технические характеристики колонок из различного типа изоляторов приведены в табл. 19.8, из которой следует, что с увеличением числа последовательно соединенных изоляторов их механическая прочность на изгиб уменьшается [19.12]. Поэтому для обеспечения необходимой механической прочности используют вертикальные двойные или строенные колонки (треноги), оси которых располагаются под некоторым углом к вертикали [19.1].

Проходные изоляторы

Проходные изоляторы для внутренней установки предназначены для механического крепления и изоляции токоведущих частей электрических аппаратов и закрытых распре-

делительных устройств электрических станций и подстанций, комплектных устройств и трансформаторных подстанций. Изоляторы изготавливают в климатических исполнениях У, ХЛ, Т категорий размещения 2, 3 (ГОСТ 22229-83).

Конструкция проходного изолятора представляет собой полое цилиндрическое тело из электротехнического фарфора с ребристой наружной поверхностью, армированное металлическим фланцем. Внутри полости располагаются одна или две токоведущие шины (рис. 19.21). Промышленность выпускает проходные изоляторы на номинальные напряжения 6, 10, 20, 24, 35 кВ и номинальные токи 400, 630, 1000, 1600, 2000, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10 000, 16 000, 30 000 А с минимальными раз-

рушающими нагрузками на изгиб 375, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4250 даН; конструктивные исполнения — I, II, III (ГОСТ 20454-79).

Проходные изоляторы для наружно-внутренней установки предназначены для изоляции и соединения токоведущих частей закрытых распределительных устройств электрических станций и подстанций, комплектных распределительных устройств, трансформаторных подстанций с открытыми распределительными устройствами или линиями электропередачи. Изоляторы выпускают в климатических исполнениях У, ХЛ, Т, категорий размещения 1 для наружного конца и 2, 3 для внутреннего (ГОСТ 21740-76).

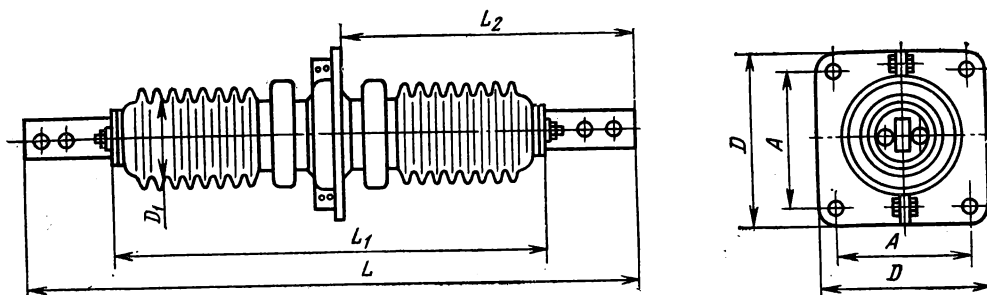


Рис. 19.21. Проходной изолятор внутренней установки с одной токоведущей шиной

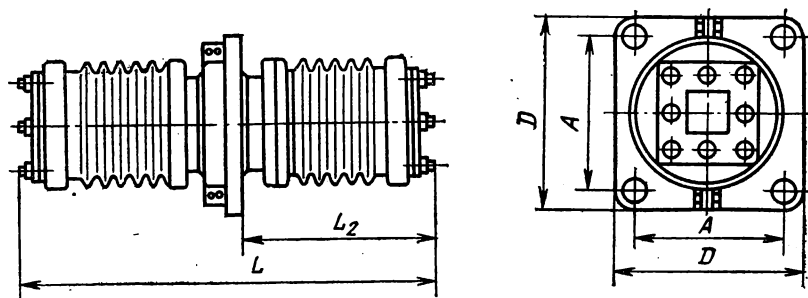


Рис. 19.22. Проходной изолятор внутренней установки, выпускаемый без токоведущей шины

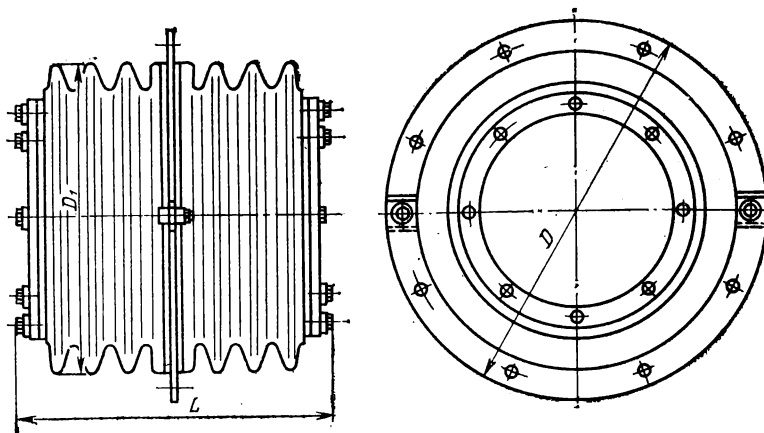


Рис. 19.23. Проходной изолятор внутренней установки на номинальный ток 6300 А

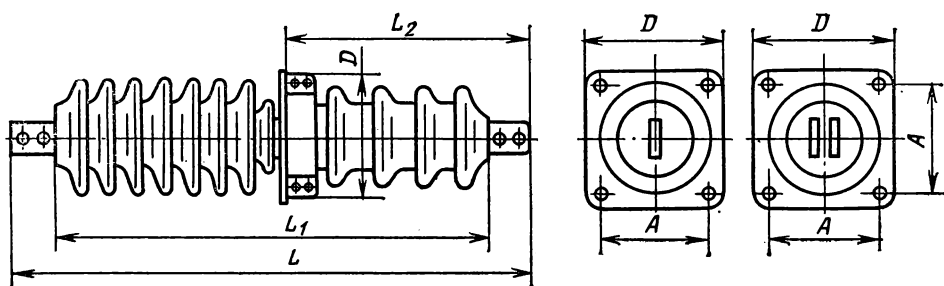


Рис. 19.24. Проходной изолятор наружно-внутренней установки с одной или двумя токоведущими шинами

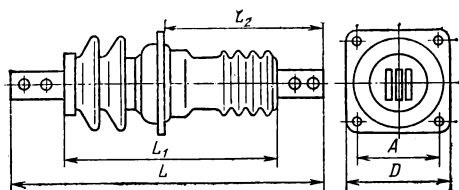


Рис. 19.25. Проходной изолятор наружно-внутренней установки с тремя шинами

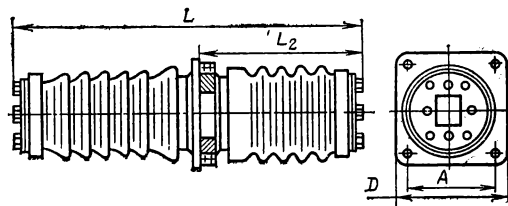


Рис. 19.26. Проходной изолятор наружно-внутренней установки, выпускаемый без токоведущей шины

Номинальные напряжения таких изоляторов составляют 10, 20, 35 кВ, номинальные токи — 400, 630, 1000, 1600, 2000, 3150, 5000, 6300, 8000, 10 000 А и минимальные разрушающие нагрузки на изгиб — 750, 1250, 2000, 4250 даН (ГОСТ 20479-79). Конструкции таких изоляторов могут содержать одну, две (рис. 19.24) или три (рис. 19.25) токоведущие шины.

Проходные изоляторы на номинальные токи 2000 А и выше с разрушающей нагрузкой 2000 даН и более изготавливают без токоведущих шин (рис. 19.22, 19.23, 19.26).

На внутреннюю поверхность изоляционного тела и поверхность, предназначенную для крепления фланца, у изоляторов на напряже-

ние 20 и 35 кВ наносится полупроводящее или проводящее покрытие, которое имеет электрический контакт с соответствующими металлическими частями изолятора.

Длина пути утечки наружной части изолятора, работающей в открытой атмосфере, удовлетворяет требованиям ГОСТ 9920-75. Конструкция изоляторов со стороны наружного конца исключает возможность попадания влаги во внутреннюю полость изолятора.

Токоведущие части изоляторов исполнений У и ХЛ изготавливают из алюминия и алюминиевых сплавов по ГОСТ 15176-84. Для изоляторов исполнения Т токоведущие части изготовлены из меди или медных сплавов по ГОСТ 434-78 и защищаются гальваническим покры-

Таблица 19.9. Технические данные проходных изоляторов для работы в помещении (рис. 19.21—19.23)

Тип изолятора	№ рисунка	U _{ном} , кВ	I _{ном} , А	Минимальное разрушающее усилие на изгиб, даН	Размеры, мм					Число шин	Масса, кг	Цена, руб.
					L	L ₁	L ₂	D	A			
ИП-6/400-375 УХЛ, Т2	19.21	6	400	375	360	270	187	165	140	1	4,0	3,2
ИП-10/1000-750 УХЛ, Т2	19.21	10	1000	750	520	335	255	190	150	2	7,07	4,60
ИП-20/1000-2000 УХЛ2	19.21	20	1000	2000	740	—	329	322	266	1	49,0	79,0
ИП-10/5000-4250 У2	19.22	10	5000	4250	640	—	315	555	495	**	75,0	127,0
ИП-20/6300-2000 УХЛ2	19.23	20	6300	2000	740	—	—	750	710	**	106,0	152,0
ИП-20/10 000 У, Т2	19.23	20	10 000	*	462	—	314	625	563	**	48,0	114,0
ИП-20/16 000 У, Т2	19.23	20	16 000	*	480	—	220	1030	990	**	112,0	127,0
ИП-24/30 000-3000 УХЛ, Т2	19.23	24	30 000	3000	545	—	423	250	200	**	239,0	520,0
ИП-35/400-750 УХЛ, Т2	19.21	35	400	750	910	805	423	250	200	1	30,2	26,5
ИП-35/630-750-1 УХЛ, Т2	19.21	35	630	750	910	805	423	250	200	1	31,3	32,0
ИП-35/1000-750 УХЛ, Т2	19.21	35	1000	750	1010	800	473	260	200	2	34,0	29,5
ИП-35/1600-750 УХЛ, Т2	19.21	35	1600	750	1010	800	473	260	200	2	34,5	30,5

* Не нормируется.

** Поставляется без шин.

Таблица 19.10. Технические данные проходных изоляторов для наружно-внутренней установки (рис. 19.24—19.26)

Тип изолятора	Номер рисунка	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	Минимальное раз- решающее усилие на изгиб, даН	Размеры, мм					Число шин	Масса, кг	Цена, руб.
					L	L_1	L_2	D	A			
ИП-10/630-750 УХЛ, Т1	19.24	10	630	750	565	355	340	180	140	1	17,0	5,8
ИП-10/1000-750 УХЛ, Т1	19.24	10	1000	750	565	355	340	180	140	2	14,0	8,60
ИП-10/1000-1250 УХЛ, Т1	19.24	10	1000	1250	565	360	335	205	155	2	11,3	16,6
ИП-10/2000-1250 УХЛ, Т1	19.24	10	2000	1250	640	375	380	240	195	2	11,3	16,6
ИП-10/3150-1250 УХЛ, Т1	19.25	10	3150	1250	640	375	380	240	195	3	12,0	16,6
ИПУ-10/1000-750 УХЛ, Т1	19.24	10	1000	750	620	410	340	180	140	2	14,0	8,6
ИП-20/2000-1250 УХЛ, Т1	19.24	20	2000	1250	865	636	468	270	220	2	34,0	45,0
ИП-20/3150-1250 УХЛ, Т1	19.25	20	3150	1250	886	675	468	270	220	3	37,4	53,0
ИП-35/400-750 УХЛ1	19.24	35	400	750	1020	850	480	250	200	1	34,4	26,5
ИП-35/630-750 УХЛ, Т1	19.24	35	630	750	1040	854	476	250	200	1	36,4	28,5
ИП-35/1000-750 УХЛ1	19.24	35	1000	750	1080	854	496	250	200	2	38,0	39,0
ИП-35/1600-750 Т1	19.24	35	1600	750	1080	850	515	260	200	2	37,3	42,0
ИПУ-35/400-750 Т1	19.24	35	400	750	1050	860	490	260	210	1	38,0	43
ИП-10/6300-4250 УХЛ, Т1	19.26	10	6300	4250	736	—	377	555	495	*	81,0	76,0
ИП-10/10000-4250 УХЛ, Т1	19.26	10	10 000	4250	711	—	353	555	495	*	78,0	71,5
ИП-35/3150-2000 УХЛ, Т1	19.25	35	3150	2000	1092	—	507	342	285	3	85,0	104,0
ИП-35/6300-2000 УХЛ, Т1	19.26	35	6300	2000	1081	—	512	360	304	*	92,5	86,0
ИП-35/5000-4250 УХЛ, Т1	19.26	35	5000	4250	1308	—	588	650	590	*	250,0	257,0

* Поставляется без шин.

тием или горячим лужением. Арматура изоляторов изготовлена из алюминиевых сплавов по ГОСТ 2685-75. Допускается применение чугуна по ГОСТ 1412-79.

Армирование изоляторов осуществляется цементным раствором с применением портланд-цемента марки 400 (ГОСТ 10178-76). Прокладки изоляторов, компенсирующие промазки и влагостойкие покрытия — из тех материалов, что и в опорных изоляторах.

Срок службы изоляторов составляет 20 лет, интенсивность отказов — не более $6 \cdot 10^{-7}$ ч⁻¹.

Обозначение проходных изоляторов: И — изолятор; П — проходной; У — усиленная изоляция; числитель — номинальное напряжение, кВ; знаменатель — номинальный ток, А; следующая цифра — разрушающая нагрузка на изгиб, даН; затем климатическое исполнение и категория размещения.

Технические характеристики проходных изоляторов для внутренней и наружно-внутренней установки приведены в табл. 19.9 и 19.10.

19.5. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ВВОДЫ НА 110 кВ И ВЫШЕ

Высоковольтные вводы предназначены для изоляции высокого напряжения силовых трансформаторов и реакторов, масляных выключателей, распределительных устройств на классы напряжения 110—750 кВ частоты 50 Гц, а также шунтирующих реакторов бронзового типа на 500 и 750 кВ, для штекерного подключения трансформаторов на 220 кВ и для кабельного подключения трансформаторов на 110 и 500 кВ. Разработаны вводы на 1150 кВ.

Номинальные токи вводов соответствуют ряду 200; 315; 630; 1000; 1600; 2000; 2500; 3150 и 4000 А. Допустимые углы наклона ввода к вертикали составляют 15; 20; 30; 45; 60 и 90° (ГОСТ 10693-81).

Исполнения вводов — У, ХЛ, Т, категория размещения 1. Высоковольтные вводы — это проходные изоляторы, содержащие в себе самостоятельные элементы внешней и внутренней изоляции. Конструкция ввода состоит из следующих основных частей (рис. 19.27): центральной трубы 1 из меди или латуни, внутренней изоляции 2, верхней 3 и нижней 4 фарфоровых покрышек, соединительной втулки 5, верхнего 6 и нижнего 7 экранов.

Труба служит для соединения фарфоровых покрышек и втулки в единое целое с помощью прокладок из маслостойкой резины и специ-

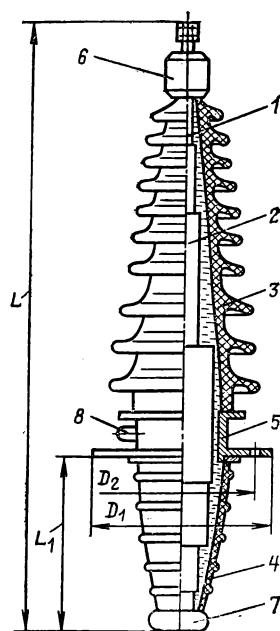


Рис. 19.27. Герметичный высоковольтный ввод с внутренней компенсацией

Таблица 19.11. Технические данные герметичных и маслонаполненных вводов

Тип ввода	Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	$I_{ном}$, А	Размеры, мм (рис. 19.27)				Вид температурной компенсации	Масса, кг		Цена, руб.
			L	L_1	D_1	D_2		ввода	бака	
ГМТА-45-110/630 УХЛ, Т1	110	630	2390	663	350	300	Встроенный ком-пенсатор	136	—	345
ГМТБ-45-110/630 УХЛ, Т1	110	630	2490	663	350	300	То же	156	—	370
ГМТА-90-110/2000 УХЛ, Т1	110	2000	2540	720	420	380	»	248	—	545
ГМТБ-90-110/2000 УХЛ, Т1	110	2000	2700	720	420	380	»	278	—	710
ГМТБ-45-150/630 У, Т1	150	630	3150	848	350	310	»	272	—	660
ГМТА-45-150/630 У, Т1	150	630	2950	848	350	310	»	256	—	650
ГМТБ-45-150/2000, У, Т1	150	2000	3410	994	420	380	»	477	—	1200
ГМТА-45-150/2000, У, Т1	150	2000	3210	994	420	380	»	420	—	1000
ГМТБ-90-220/1000, У1	220	1000	4690	1530	670	620	Выносной бак давления	840	96	2100
ГМТБ-90-220/630-1000 У1	220	630	5205	1530	670	620	Встроенный ком-пенсатор	980	—	2300
ГМТБ-90-220/1600-2000 У1	220	2000	5205	1530	670	620	То же	980	—	2300
ГМТБ-45-220/2000 УХЛ, Т1	220	2000	4645	1380	600	560	»	975	—	1800
ГМТА-45-220/2000 УХЛ, Т1	220	2000	4345	1380	600	560	»	853	—	1600
ГМТПА-45-330/1000 У1	330	1000	5505	2160	818	770	Выносной бак давления	1598	121	3100
ГМТПБ-45-330/1000 У1	330	1000	6415	2160	818	770	То же	1818	121	3300
ГМТПА-45-330/2000 У1	330	2000	4975	1615	600	560	»	1249	121	2780
ГМТПБ-45-330/2500 У1	330	2500	5265	1615	600	560	Встроенный ком-пенсатор	1108	—	2590
ГМТПА-30-500/1600 У1, ХЛ1, Т1	500	1600	7150	2600	1200	1130	Выносной бак давления	2730	226	5300
ГМТА-30-500/1600 У1, ХЛ1, Т1	500	1600	7300	2750	1200	1130	То же	2860	226	5400
ГМТПБ-30-500/2000 У1, ХЛ1, Т1	500	2000	7150	2600	1200	1130	»	3160	226	6400
ГМТА-30-500/2500 У1, ХЛ1	500	2500	7150	2600	1200	1130	»	2490	226	5200
ГМТПА-30-750/1000 У1	750	1000	8500	2710	1200	1130	»	3410	226	6400
ГМВБ-15-110/2000 У1	110	2000	3025	1130	550	486	»	244	22	720
ГМЛПБ-90-110/1000 У1	110	1000	3610	1805	420	360	Встроенный ком-пенсатор	374	—	685
ГМЛПБ-90-110/2000 У1	110	2000	3640	1820	420	360	То же	376	—	680
ГМТА-90-220/1000 У1	220	1000	5645	3135	890	840	»	1497	—	2100
ГМРА-0-500/315 У1	500	315	6966	2204	1200	1130	Выносной бак давления	2956	225	5700
ГМРА-0-750/315 У1	750	315	8400	2620	1200	1130	То же	3436	225	6900
ГМТ* _{каб} -45-110/630 У1	110	630	1650	670	350	300	»	78	12	380
ГТТА-60-110/800 У1	110	800	2480	970	290	290	Встроенный ком-пенсатор	100	—	860

* Для кабельного подключения трансформаторов.

альных пружин, расположенных внутри верхнего экрана. Фарфоровые покрышки с нормальной или усиленной изоляцией являются внешней изоляцией ввода. Во вводах используется внутренняя изоляция конденсаторного типа, в которой металлические или неметаллические слои чередуются с изоляционным материалом. В качестве последнего используется бумажно-масляная или твердая изоляция.

В линейных вводах и у вводов для масляных выключателей труба является токоведущим элементом. В трансформаторных вводах токоведущим элементом является проходящий внутри трубы кабель. Внутреннее свободное пространство ввода заполняется нефтяным маслом.

Наибольшей эксплуатационной надежностью обладают вводы герметичного исполнения. Для компенсации температурного изменения объема масла используют либо внутренние компенсаторы сильфонного типа, либо выносной бак давления.

Внутренние компенсаторы помещаются в верхней части ввода. В случае применения выносного бака давления его соединение с втулкой 5 осуществляется посредством гибкого ме-

таллического трубопровода. Для контроля за давлением масла применяется манометр в брызгозащитном исполнении.

На соединительной втулке 5 имеется изолированный от нее вывод или специальный вывод 8 у вводов с измерительным конденсатором для подключения приспособления для измерения напряжения (ПИН), служащего для контроля качества изоляции.

Условное обозначение вводов (например, ГМТПА-45-330/1000 У1): Г — герметичный; М — с масляной пропиткой (Т — с твердой пропиткой); Т — для трансформаторов или реакторов (В — для выключателей, Р — для специальных реакторов, Л — линейный); П — с измерительным конденсатором, предназначенным для подключения приспособления для измерения напряжения (ПИН); А — с нормальной внешней изоляцией (Б — с усиленной); 45° — допустимый угол наклона к вертикали; 330 — класс напряжения, кВ; 1000 — номинальный ток, А; У1 — исполнение и категория размещения.

Срок службы вводов — не менее 25 лет. Вероятность безотказной работы в течение 5 лет равна 0,999.

В табл. 19.11 приведены основные технические характеристики вводов.

19.6. ЛИНЕЙНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Линейные изоляторы предназначены для изоляции и крепления проводов на воздушных линиях электропередачи и распределительных устройствах электрических станций и подстанций.

Штыревые линейные изоляторы находят применение на линиях электропередачи напряжением до 35 кВ включительно.

Климатические исполнения — У, ХЛ, категория размещения 1 на номинальное напряжение 6—20 кВ; изоляторы изготовляют одноэлементными. Одноэлементные изоляторы изготовляют как из электротехнического фарфора (рис. 19.28), так и из стекла (рис. 19.29).

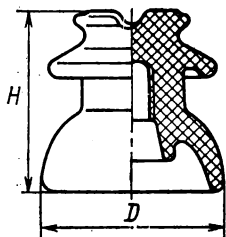


Рис. 19.28. Линейный штыревой фарфоровый изолятор на напряжение до 10 кВ ШФ10-Г

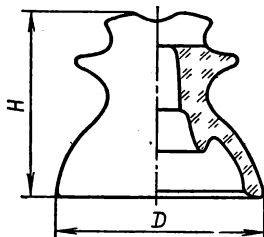


Рис. 19.29. Линейный штыревой стеклянный изолятор на напряжение до 10 кВ ШС10-Г

В условном обозначении изолятора буквы и цифры обозначают: Ш — штыревой, Ф — фарфоровый, цифра — номинальное напряжение, кВ; последняя буква — исполнение изолятора. У стеклянных изоляторов вторая буква — С.

Срок службы изоляторов 30 лет. Вероятность безотказной работы изоляторов $P(t)$ — в пределах срока службы, определяемого по формуле

$$P(t) = 1 - \lambda t,$$

где λ — среднегодовой уровень отказов, равный $0,001 \text{ год}^{-1}$; t — период с момента выпуска изоляторов предприятием-изготовителем, лет.

Технические характеристики штыревых изоляторов приведены в табл. 19.12.

Линейный изолятор тарельчатого типа является самой распространенной конструкцией на линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше. Для изготовления изоляционной детали изолятора используют электротехнический фарфор или закаленное стекло. Изоляторы та-

рельчатого типа выпускают на минимальные разрушающие нагрузки на растяжение 40 000, 70 000, 100 000, 120 000, 210 000 и 300 000 Н климатических исполнений У, ХЛ категории 1. Исполнение изоляторов обозначают прописными буквами А, Б, В. На рис. 19.30 показана

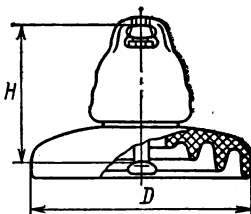


Рис. 19.30. Линейный изолятор тарельчатого типа для нормальных условий эксплуатации

конструкция фарфорового изолятора нормального исполнения (ГОСТ 6490-75).

Для линий электропередачи, расположенных в районах с загрязненной атмосферой, разработаны конструкции изоляторов грязеустойчивого исполнения с повышенными разрядными характеристиками и увеличенной длиной пути утечки. На рис. 19.31 приведена конструкция стеклянного изолятора грязеустойчивого исполнения с удлиненными ребрами, а на рис. 19.32 — стеклянного изолятора с удлиненным отогнутым ребром (ГОСТ 21799-76).

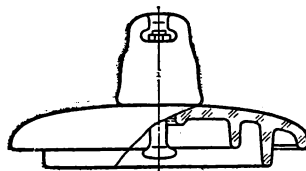


Рис. 19.31. Линейный стеклянный изолятор тарельчатого типа грязеустойчивого исполнения ПГС 120-А

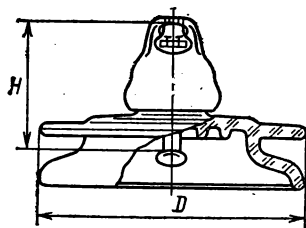


Рис. 19.32. Стеклянный изолятор тарельчатого типа грязеустойчивого исполнения с вытянутыми и отогнутым ребром ПГС 70-Д

Т а б л и ц а 19.12. Технические данные линейных штыревых изоляторов

Тип изолятора	№ рисунка	Нормирован- ная механи- ческая на- грузка на изгиб, кН, не менее	Напряжение, кВ					Основные размеры, мм		Длина пути утечки, мм	Масса, кг	Цена, руб.
			пробивное, 50 Гц	в сухом состоянии, 50 Гц	под дождем, 50 Гц	импульсное при волне		H	D			
						+1,2/50 мкс	-1,2/50 мкс					
ШФ10-Г	19.28	13,0	140	63	36	95	95	140	140	265	1,8	0—96
ШФ20-В	19.28	13,0	180	82	57	125	130	184	175	385	3,5	1—64
ШС10-А	19.29	14,0	100	55	30	100	105	110	150	210	1,4	0—39
ШС10-Г	19.29	12,5	130	55	35	80	80	145	160	265	2,1	0—75

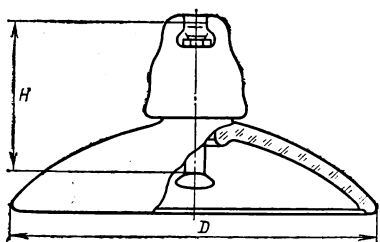


Рис. 19.33. Стеклянный изолятор тарельчатого типа с улучшенными аэродинамическими характеристиками

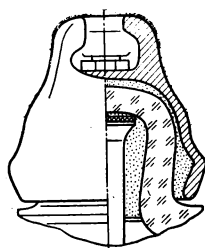


Рис. 19.34. Коническая конструкция силового узла изолятора

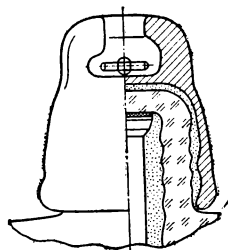


Рис. 19.35. Цилиндрическая конструкция силового узла изолятора

Для районов с загрязненной атмосферой весьма перспективной является конструкция стеклянного изолятора, обладающего высокими аэродинамическими свойствами (рис. 19.33). Срок службы фарфоровых изоляторов составляет 30 лет с вероятностью безотказной работы за первый год эксплуатации 0,9970, по истечении гарантийного срока — не менее 0,9940, а в период срока службы — не менее значения, определяемого по формуле $P(t) = 0,9940 - 0,0028(t-2)$, где t — период с момента выпуска изоляторов предприятием-изготовителем, лет; 0,0028 — коэффициент, характеризующий годовую повреждаемость, 1/год; 2 — гарантийный срок, лет.

Срок службы стеклянных изоляторов составляет 30 лет с вероятностью безотказной работы за первый год эксплуатации 0,9970, по истечении гарантийного срока 0,9920, а в период срока службы — не менее значения, определяемого по формуле $P(t) = 0,9920 - 0,0024(t-3)$, где t — период с момента выпуска изоляторов предприятием-изготовителем, лет; 0,0024 — коэффициент, характеризующий годовую повреждаемость, 1/год; 3 — гарантийный срок, лет.

В условном обозначении изолятора буквы и цифры означают: П — подвесной, Ф (или С) — фарфоровый (или стеклянный); Г — для

загрязненных районов; цифра — класс изолятора, кН; буква — исполнение изолятора.

Технические характеристики линейных изоляторов тарельчатого типа приведены в табл. 19.13.

В последние годы в конструкции изоляторов осуществляется переход от конической конструкции силового узла (рис. 19.34) к цилиндрической основе (рис. 19.35), позволяющей существенно снизить массу и габариты изоляторов при прочих равных условиях.

19.7. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОКОНСТРУКЦИОННЫХ ПЛАСТМАСС В ИЗОЛЯТОРНОЙ ТЕХНИКЕ

Значительное повышение в последние годы передаваемых на большие расстояния мощностей и номинальных напряжений линий электропередачи приводит к резкому увеличению механических нагрузок, действующих на высоковольтные изоляторы. В создаваемых для этих целей новых конструкциях изоляторов отчетливо проявляется большой недостаток электротехнического фарфора как конструктивно-

Таблица 19.13. Технические данные линейных изоляторов тарельчатого типа

Тип изолятора	№ рисунка	Электромеханичес- кая разрушающая нагрузка, кН	Напряжение, кВ					Уровень радиопомех при 20 кВ	Основные размерь, мм		Длина пути утечки, мм	Отношение длины пути утечки к H	Масса, кг	Цена, руб.
			пробивное, 50 Гц	выдерживаемое под дождем, 50 Гц	рабочее по уров- ню радиопомех, 50 Гц, 80 дБ	выдерживаемое импульс- ное при волне								
						+1,2/50 мкс	-1,2/50 мкс							
									H	D				
ПФ70-В	19.30	70	130	34	30	100	110	60	146	270	355	2,43	4,85	3—15
ПС70-Д	19.30	70	130	40	35	100	100		127**/146	255	290	2,28	3,5	1—90
ПС120-А*	19.30	120	130	45	35	110	115	60	146	260	325	2,21	5,4	3—25
ПС120-Б	19.30	120	130	40	35	100	100		146	255	330	2,26	4,15	3—25
ПС160-Б*	19.30	160	130	35	40	95	105	60	170	280	368	2,17	7,73	5—60
ПС160-В	19.30	160	130	45	40	110	115		146**/170	280	370	2,53	6,33	5—60
ПС210-Б	19.30	210	130	42	34	110	115	60	170	320	375	2,2	8,27	5—80
ПС300-А	19.30	300	130	52	37	85	90		175	450	440	2,51	13,3	13—70
ПС400-А	19.30	400	130	55	40	125	120	60	200	390	450	2,25	15,6	17—10
ПСГ70-Д*	19.32	70	130	40	30	125	120		127	270	395	3,11	4,55	2—80
ПСГ70-А*	19.32	70	130	40	30	120	120	60	127	270	394	3,1	4,99	2—80
ПСГ120-А	19.31	120	130	48	35	110	110		146	300	425	2,9	6,75	3—90

* Конструкции изоляторов с коническим силовым узлом.

** Конструкция изоляторов, выпускаемых со строительной высотой двух значений для получения требуемой длины утечки и длины гирлянды.

Таблица 19.14. Основные физико-технические показатели электротехнического фарфора, стекла и некоторых электроконструкционных пластмасс

Характеристика	Материал					
	Электро-технический фарфор	Щелочное стекло № 7	Малощелочное стекло 13 В	Эпоксидный компаунд с кварцевым наполнителем	Стекло-текстолит СТЭФ-1	Анизотропный стеклопластик АГ-4с
Плотность, кг/м ³	2400	2470	2510	1600	1700	1800
Удельная ударная вязкость, кДж/м ²	1,9	1,8—2,1	1,8—2,1	14—22	65	250
Предел прочности при изгибе, МПа	80	60	65	120—150	240	570—650
Предел прочности при растяжении, МПа	35—50	82	89	80—100	200	600
Предел прочности при сжатии, МПа	600	973	960	190	300	200
Температурный коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	4	8,5	5,6	3—4	8	2—3
Электрическая прочность, МВ/м	32	45	48	30	32	25
Удельное объемное сопротивление при 20 °C, Ом·м	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹²	5·10 ¹²	5·10 ¹¹	5·10 ¹¹
Удельное поверхностное сопротивление при 70 %-ной относительной влажности, Ом	10 ¹²	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹²
Относительная диэлектрическая проницаемость tg δ	6,5	7,2	6,9	4,4	7,0	7,2
	0,022	0,027	0,024	0,02	0,025	0,025

го материала — низкая механическая прочность на растяжение и изгиб, т. е. сопротивление тем нагрузкам, которым они подвергаются в большинстве высоковольтных изоляторов.

В этих условиях изыскание новых электроизоляционных материалов, обладающих более высокими механическими характеристиками, приобретает все большую актуальность.

За последние годы в этом направлении достигнут определенный прогресс. Использование в изоляторостроении специальных стекол позволяет существенно сократить габариты и массу изоляторов, так как термическая и механическая прочность стекла может быть значительно увеличена путем закалки [19.12].

К снижению габаритов и массы изоляторов приводит применение для этих целей литевых электроизоляционных компаундов, например на основе эпоксидных смол [19.13]. При этом значительно сокращается время технологического цикла изготовления изоляторов.

Однако возникшая проблема увеличения механической прочности исходных материалов для высоковольтных изоляторов и снижения их массы не получила должного решения. В связи с этим большого внимания заслуживает использование в изоляторостроении современных электроконструкционных пластмасс, которые по прочностным характеристикам приближаются к некоторым сортам сталей и обладают хорошими электроизоляционными свойствами. Из приведенных в табл. 19.14 данных следует, что такие конструкционные материалы, как стеклотекстолит СТЭФ-1 и особенно анизотропный стеклопластик АГ-4с, значительно превосходят по упругости и механической прочности на растяжение и изгиб электротехнический фарфор и специальные стекла, имеющие к тому же большую плотность.

Приведенные данные показывают, что анизотропные стеклопластики типа АГ-4с могут быть поставлены в ряд перспективных электроконструкционных материалов для изоляторной техники.

Для электроизоляционных материалов изоляторной техники важным является стабильность свойств в условиях эксплуатации.

Результаты исследований зависимостей удельного поверхностного сопротивления на постоянном и переменном напряжении частотой 50 Гц, а также напряжения перекрытия от влажности, загрязнения и времени пребывания в условиях высокой относительной влажности в сравнении с электротехническим фарфором показывают, что материал АГ-4с по электрофизическим свойствам несколько превосходит электротехнический фарфор.

Исследование изменения основных физико-технических свойств стеклопластика АГ-4с от времени пребывания в открытой атмосфере средней полосы СССР в течение 6 лет показывает, что с течением времени воздействия атмосферных условий электрофизические характеристики слабо изменяются. Однако под действием солнечной радиации происходит эрозия связующего. После 6-летнего пребывания в открытой атмосфере потеря в массе образцов составила 3 %.

Развитие химии и технологии полимеров позволяет применять для защиты стеклопластиковых стержней механически прочные атмосферостойкие покрытия или использовать гидрофобные электроизоляционные оболочки с ребрами, что в значительной степени повышает атмосферостойкость стеклопластиковых изоляторов.

Таким образом, применение анизотропных стеклопластиков в изоляторной технике может дать большой технико-экономический эффект.

19.8. КОНСТРУКЦИИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Линейная изоляция из полимерных материалов обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными изоля-

Таблица 19.15. Сравнительные технические данные стержневых линейных изоляторов и гирлянд из традиционных изоляторов

Тип полимерного изолятора	Электро-механическая разрушающая нагрузка при растяжении, кН	Размеры, мм		Длина пути утечки, мм	Масса, кг	Размеры гирлянды традиционных изоляторов			Масса гирлянды, кг	Отношение масс
		$H_{стр}$	D			Число изоляторов, шт.	H , мм	D , мм		
ЛК70/110	70	1350	—	2640	3,8	7	890	255	24,5	6,4
ЛК70/200	70	2200	—	4800	5,9	14	1780	255	49,0	8,3
ЛК70/330	70	2980	—	6600	7,6	19	2415	255	66,5	8,75
ЛК160/330	160	3040	110	7200	12,2	15	2190	280	95,0	7,8
ЛК160/500	160	3860	110	9600	16,0	22	3210	280	139,3	8,7
ЛК160/750	160	6200	110	14 400	27	35	5110	280	221,6	8,2
ЛК300/330	300	3010	130	6860	17,2	12	2100	450	160,0	9,3
ЛК300/500	300	3840	130	9130	21,7	18	3150	450	239,4	11,0
ЛК300/750	300	6170	130	13 700	42,0	29	5075	450	386,0	9,2

торами, из которых главными являются значительно меньшая масса, более простой монтаж и обслуживание.

На рис. 19.36 показана конструкция полимерного изолятора на напряжение 110—330 кВ. Основной конструкции полимерного изолятора, воспринимающей всю механическую нагрузку, является стеклопластиковый стержень 1, электрическую прочность изолятора с необходимой длиной пути утечки обеспечивают ребра 2 из кремнеорганической резины, посаженной на стержень с помощью герметика. Монтаж изолятора производится с помощью оконцевателей 3, 4, опрессованных на стеклопластиковый стержень. Экранные диски 5, 6 выравнивают электрическое поле.

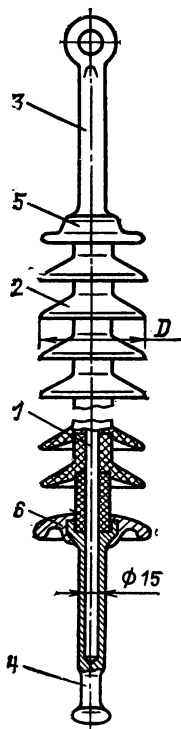


Рис. 19.36. Линейный полимерный изолятор типа ЛП2 на напряжение 110—330 кВ

Конструкция состоит из изолирующих элементов 1, 2, 4 и оголовника 3.

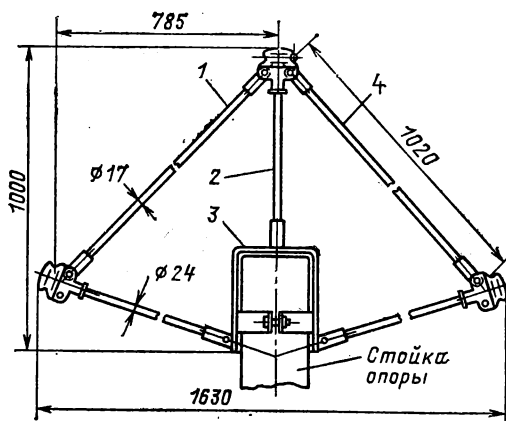


Рис. 19.37. Линейная полимерная изолирующая конструкция (траверса) типа СТИ на напряжения 6—10 кВ

Таблица 19.16. Электромеханические характеристики полимерных изоляционных траверс для ВЛ 6—220 кВ

Наименование показателя	Норма для типа		
	СТИ-10 М1	ТПИ 110	ТПИ 220
Напряжение, кВ:			
нормированное испытательное грозового импульса с формой волны 1,2/50 мкс	80	520	950
испытательное коммутационного импульса 250/2500 мкс под дождем	—	375	620
испытательное частотой 50 Гц в сухом состоянии	47	—	—
испытательное частотой 50 Гц под дождем	34	215	425
Механическая разрушающая нормированная вертикальная сила, кН	2,5	38	75

Список литературы

- 19.1. Техника высоких напряжений/Под ред. Д. В. Разеви́га М.: Энергия, 1976. 488 с.
 19.2. Александров Г. Н., Иванов В. Л. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 208 с.
 19.3. ГОСТ 1516.1-76. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности. ГОСТ 1516.2-76. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения от 3 кВ и выше. Общие методы испытания электрической прочности изоляции. СТ СЭВ 1071-78. Электрооборудование и электроустановки. Термины, определения и общие условия испытания высоким напряжением. СТ СЭВ 1072-78. Электрооборудование и электроустановки. Методы испытания высоким напряжением.
 19.4. Руководящие указания по выбору и эксплуатации изоляции в районах с загрязненной атмосферой. М.: СЦНТИ, 1975.
 19.5. Разеви́г Д. В., Соколова М. В. Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков. М.: Энергия, 1977. 200 с.

- 19.6. Синявский В. Н. Расчет и конструирование электрокерамических конструкций. М.: Энергия, 1977. 192 с.
 19.7. Колечицкий Е. С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1983. 168 с.
 19.8. Колечицкий Е. С. Анализ и расчет электрических полей. Ч. I и II. М.: МЭИ, 1977.
 19.9. Колечицкий Е. С., Филиппов А. А. Методические указания к практическим занятиям и расчетам по курсу «Анализ и расчет электрических полей». М.: МЭИ, 1978.
 19.10. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968. 488 с.
 19.11. Резвых К. А. Расчет электростатических полей. М.: Энергия, 1967. 120 с.
 19.12. Электрические изоляторы/Н. С. Костюков, Н. В. Минаков, В. А. Князев и др.; Под ред. Н. С. Костюкова. М.: Энергоатомиздат, 1984. 296 с.
 19.13. Цимберов А. И., Штерн А. В. Стекланные изоляторы. М.: Энергия, 1973. 200 с.
 19.14. Черняк К. И. Эпоксидные компаунды и их применение. Л.: Судпромгиз, 1963. 254 с.

Раздел 20

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ
И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

СОДЕРЖАНИЕ

20.1. Полупроводниковые диоды	95
20.2. Транзисторы	96
Биполярные транзисторы (96). Полевые транзисторы (98). Приборы с зарядовой связью (100). Эквивалентные схемы биполярных транзисторов (100). Эквивалентные схемы полевых транзисторов (103)	
20.3. Тиристоры	104
20.4. Оптоэлектронные приборы	106
Вентильные фотоэлементы и фотодиоды (106). Фототранзисторы (106). Оптоны. Светодиодающие приборы (107)	
20.5. Классификация полупроводниковых приборов и интегральных схем	107
Силовые тиристоры (109)	
20.6. Интегральные операционные усилители и их применение	110
Основные параметры ОУ (112). Обратные связи в ОУ (112). Суммирование напряжений (113). Интегрирование напряжения (113). Стабилизация напряжения (113). Активные фильтры (114). Огра-	

нители напряжения (114). Компараторы (115). Генераторы прямоугольного напряжения (115). Преобразователи напряжения в частоту и длительность импульса (116)	
20.7. Логические интегральные микросхемы и их применение	116
Типы логических схем (116). Основные понятия о логических функциях (117). Соотношения алгебры логики (117). Минимизация логических выражений (118). Примеры описания и минимизации логических схем (118). Аппаратурная реализация логических зависимостей (120). Дешифраторы (121). Триггеры и триггерные устройства (121). Счетчики (122). Регистры (123). Распределители (124). Синтез схем с памятью (124). Логические узлы на основе микросхем с повышенной степенью интеграции (125). Микропроцессоры (127). Ввод программ и данных (129)	

Список литературы	130
-----------------------------	-----

20.1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Основой большинства полупроводниковых приборов является электронно-дырочный ($p-n$) переход, возникающий на контакте двух полупроводников с различным типом проводимости (см. разд. 3).

В полупроводниковых приборах обычно применяются несимметричные $p-n$ переходы. В несимметричных переходах для концентраций основных носителей справедливо соотношение $p_p \gg n_n$, поэтому область с большей концентрацией основных носителей является доминирующим источником подвижных носителей и получила название эмиттера, а более высокоомная область называется базой.

Электронно-дырочный переход является основным элементом простейшего электропреобразовательного прибора — полупроводникового диода. Такой переход обладает ярко выраженными вентильными свойствами. Так, если к $p-n$ переходу приложить внешнее напряжение в прямом направлении (как показано на рис. 20.1, а), то это приведет к снижению потенци-

ального барьера на границе двух областей и вызовет дополнительную инжекцию основных носителей из области p в область n , что соот-

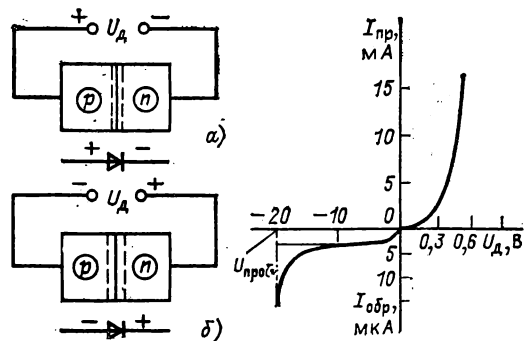


Рис. 20.1. Прямое (а) и обратное (б) смещение $p-n$ перехода

Рис. 20.2. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

ветствует увеличению тока во внешней цепи. И наоборот, если p - n переход будет смещен в обратном направлении, как показано на рис. 20.1, б, то это приведет к увеличению потенциального барьера и практически полному прекращению диффузии основных носителей через переход, что соответствует уменьшению до минимума тока во внешней цепи. График типичной вольт-амперной характеристики p - n перехода показан на рис. 20.2. Ток p - n перехода зависит от приложенного внешнего напряжения и его полярности и описывается зависимостью

$$I = I_0 \left(e^{U_{\text{п}}/\varphi_T} - 1 \right),$$

где $U_{\text{п}}$ — напряжение на собственно p - n переходе; φ_T — температурный потенциал, равный 0,026 В при 20 °С; I_0 — тепловой ток, который определяется концентрацией неосновных носителей в полупроводнике (ток насыщения).

При обратном включении диода ток определяется по формуле

$$I_{\text{обр}} = I_S + U_{\text{п}}/r_{\text{ут}},$$

где $r_{\text{ут}}$ — сопротивление утечки, учитывающее наклон обратной ветви вольт-амперной характеристики диода.

При быстром изменении напряжения, приложенного к диоду, последний вызывает искажение формы переключаемых импульсов либо частотные и фазовые искажения в случае синусоидального сигнала. Реактивные свойства диода учитываются в эквивалентной схеме замещения с помощью суммарной эквивалентной емкости C_d , численные значения которой обычно приводятся в справочных данных на диод.

Качество работы диода в электронных цепях характеризуется электрическими параметрами, приводимыми в справочнике для номинальных и предельных режимов работы. Такими параметрами являются прямой предельно допустимый ток диода $I_{\text{пр}}$, обратный номинальный ток $I_{\text{обр}}$, прямое номинальное падение напряжения при установленном выпрямленном токе $U_{\text{пр}}$, обратное предельное напряжение $U_{\text{обр}}$, предельная допустимая мощность рассеяния P_{max} , диапазон рабочих частот Δf и ряд других.

Вольт-амперная характеристика и параметры диода сильно зависят от температуры окружающей среды. Наиболее значительно меняется с температурой обратный ток диода.

Для германиевых диодов обратный ток определяется в основном тепловым током и с ростом температуры приблизительно удваивается на каждые 10 °С. У кремниевых диодов обратный ток определяется главным образом током термогенерации носителей заряда и поэтому в меньшей степени зависит от температуры окружающей среды. Если допустимый диапазон рабочих температур для германиевых диодов составляет $-60 \div +70$ °С, то для кремниевых $-60 \div +150$ °С. С увеличением температуры уменьшается также допустимая мощность, рассеиваемая диодом.

При увеличении обратного напряжения на p - n переходе сверх допустимого предела возникает пробой перехода, что выражается в резком увеличении обратного тока перехода (см. рис. 20.2). В зависимости от внешних условий пробой может быть обратимым и необратимым. Последний ведет к разрушению прибора.

Явление обратимого пробоя используется для изготовления полупроводниковых стабилизаторов — кремниевых диодов, напряжение на которых в области обратимого пробоя слабо зависит от тока. При ограничении тока состояние пробоя в стабилизаторе может поддерживаться и воспроизводиться в течение десятков тысяч часов. Промышленностью выпускается большое количество типов кремниевых стабилизаторов на различные рабочие напряжения и токи.

В зависимости от области применения диоды подразделяются на выпрямительные, импульсные, диоды с накоплением заряда, СВЧ-диоды и др. Конструктивное оформление полупроводниковых диодов может быть различным и обусловлено максимальной мощностью рассеяния, током, частотными свойствами прибора, особенностями технологии изготовления и эксплуатации. На практике находят применение конструкции с цельностеклянными, металlostеклянными, металлокерамическими, пластмассовыми корпусами и даже бескорпусные приборы.

20.2. ТРАНЗИСТОРЫ

Транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы, которые применяются для усиления мощности электрических сигналов. В зависимости от принципа действия транзисторы подразделяются на биполярные и полевые.

Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор представляет собой прибор, имеющий два взаимодействующих p - n перехода и трехслойную структуру p - n - p (или n - p - n) типа (рис. 20.3). Средняя область называется базой, а крайние — эмиттером и коллектором.

Конструкции сплавного и планарного транзисторов показаны в разрезе на рис. 20.4, а и б.

В транзисторе с равномерным распределением атомов примеси в слоях полупроводников распределение равновесных концентраций основных и неосновных носителей имеет вид, показанный пунктиром на рис. 20.3.

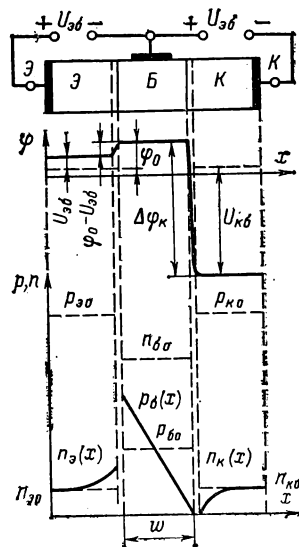


Рис. 20.3. Структура биполярного транзистора (типа p - n - p) и распределение потенциала Φ и концентрации основных и неосновных носителей в слоях полупроводников в равновесном и неравновесном состояниях

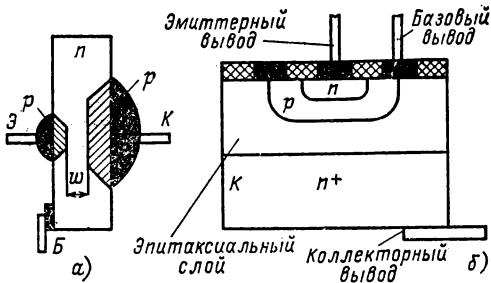


Рис. 20.4. Разрез конструкции сплавного (а) и планарного (б) транзисторов

Если к выводам транзистора приложены внешние напряжения таким образом, что эмиттерный переход смещается в прямом направлении, а коллекторный — в обратном, то такое включение называют нормальным, т. е. соответствующим усиительному режиму работы. Применительно к структуре $p-n-p$ такому смещению переходов соответствуют напряжения $U_{эб} > 0$ и $U_{кб} < 0$ (рис. 20.3).

При наличии приложенных напряжений распределение концентраций носителей и электростатического потенциала в слоях показано сплошными линиями на рис. 20.3. Как видно из рисунка, в этом случае потенциальный барьер эмиттерного перехода понижается до уровня $\Delta\phi_э = \phi_0 - U_{эб}$, а высота потенциального барьера коллекторного перехода увеличивается до уровня $\Delta\phi_к = \phi_0 - U_{кб} = \phi_0 + |U_{кб}|$ (так как $U_{кб} < 0$). Поскольку изменились потенциальные барьеры переходов, изменяются и распределения концентраций основных и неосновных носителей. В результате в базе возникает градиент концентраций неосновных носителей, под действием которого дырки, инжектированные из эмиттера, диффундируют от эмиттера к коллектору и, достигнув последнего, втягиваются полем коллекторного перехода. В коллекторной цепи транзистора появляется ток

$$I_K = I_{Kp} + I_{K0},$$

где I_{Kp} — дырочный ток коллектора; I_{K0} — тепловой (неуправляемый) ток коллекторного перехода.

Дырочный ток коллектора I_{Kp} связан с дырочным током эмиттера $I_{эp}$ соотношением

$$I_{Kp} = \alpha I_{эp} \approx \alpha I_э.$$

В современных транзисторах коэффициент α близок к 1 (0,95—0,99). Полный ток коллектора в статическом режиме определяется соотношением

$$I_K = \alpha I_э + I_{K0}.$$

Управление транзистором может осуществляться током эмиттера либо током базы. При работе транзистора с эмиттерным входом выходной величиной является ток коллектора

$$I_{вых} = I_K = \alpha I_э + I_{K0}.$$

В этом случае входной ток не усиливается (так как $\alpha < 1$), усиление мощности может быть получено только за счет усиления напряжения (в усиительном каскаде).

При управлении током базы выходной величиной может быть либо ток коллектора, либо ток эмиттера. Тогда в первом случае

$$I_{вых} = I_K = \beta I_б + (1 + \beta) I_{K0},$$

а во втором случае

$$I_{вых} = I_э = (1 + \beta) I_б + (1 + \beta) I_{K0},$$

где β — коэффициент передачи тока базы:

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha).$$

Статические режимы работы транзистора наиболее полно можно охарактеризовать с помощью статических входных и выходных характеристик транзистора. Входные характеристики представляют собой зависимость входного тока от входного напряжения при фиксированных значениях выходного напряжения, а выходные характеристики определяют зависимость выходного тока от выходного напряжения при фиксированных значениях входного тока. Таким образом, для всех трех возможных схем включения транзистора можно снять и построить соответствующие семейства входных и выходных характеристик.

Для схемы с общей базой (ОБ) входные характеристики представляют собой зависимость $I_э = f(U_{эб})$ при $U_{кб} = \text{const}$, а выходные зависимости $I_к = f(U_{кб})$ при $I_э = \text{const}$. Семейства входных и выходных характеристик для схемы с ОБ показаны на рис. 20.5, а и б. Как

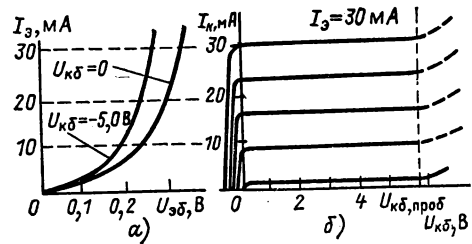


Рис. 20.5. Входные (а) и выходные (б) статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой

видно, входная статическая характеристика при $U_{кб} = 0$ аналогична характеристике обычного диода при прямом смещении и описывается зависимостью, близкой к экспоненциальной. При увеличении отрицательного смещения на коллекторном переходе характеристика смещается к оси токов вследствие внутренней обратной связи в транзисторе, обусловленной эффектом модуляции толщины базы.

Выходные характеристики транзистора в схеме ОБ практически не зависят от коллекторного напряжения в области $U_{кб} < 0$, а зависят только от управляющего тока эмиттера. Однако при смещениях $U_{кб}$, близких к напряжению пробоя $U_{кб,проб}$, происходит лавинообразное увеличение тока коллектора, что может привести к выходу прибора из строя.

Входные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ) представляют собой зависимость $I_б = f(U_{эб})$ при фиксированных значениях $U_{кб}$, а выходные — зависимость $I_к = f(U_{кб})$ при фиксированных значениях $I_б$. Семейства этих характеристик приведены на

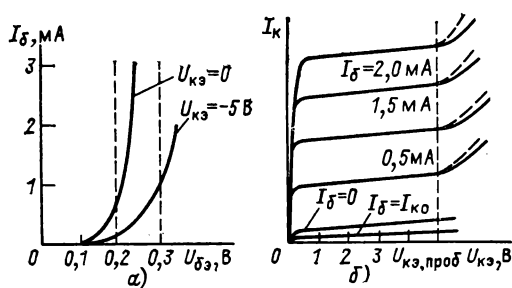


Рис. 20.6. Входные (а) и выходные (б) статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

рис. 20.6, а и б. Выходные характеристики в схеме с ОЭ гораздо сильнее зависят от коллекторного напряжения, вследствие чего они имеют больший наклон в области $U_{кэ} < 0$, чем аналогичные характеристики в схеме ОБ.

Схема включения с общим коллектором (ОК) имеет много общего со схемой ОЭ, поскольку входным, управляющим током в обоих случаях является ток базы, а выходные токи I_k и I_a различаются мало ($I_k \approx \alpha I_a$). Поэтому семейства входных и выходных характеристик в схеме ОК будут практически такими же, как и в схеме ОЭ.

Полевые транзисторы

Полевые транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы, ток в которых обусловлен дрейфом основных носителей заряда под действием продольного электрического поля. Управление током в таком приборе осу-

ществляется за счет изменения проводимости полупроводника с помощью поперечного электрического поля.

В настоящее время получили применение две основные разновидности полевых транзисторов: транзисторы с управляющим $p-n$ переходом и транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы). Схемные обозначения и графики вольт-амперных характеристик $I_c = f(U_{зи})$ сведены в таблицу и приведены на рис. 20.7. На рис. 20.8 приведена упрощенная структура полевого транзистора с управляющим $p-n$ переходом. В исходную пластину полупроводника n -типа на противоположных сторонах методом сплавления (или диффузии) вводятся акцепторные примеси, так чтобы образовались области p -типа. Между областями с противоположными типами проводимости образуется $p-n$ переход. Область n -типа, заключенная между двумя $p-n$ переходами, образует проводящий канал.

Область, от которой начинают движение основные носители в канале, получила название истока. Область, к которой движутся основные носители в канале, называется стоком. Области p -типа, используемые для управления током в канале, образуют затвор. В соответствии со сказанным внешние электроды (выводы) получили аналогичные названия.

Между затвором и истоком подается напряжение такой полярности, чтобы оно создавало обратное смещение $p-n$ перехода, а напряжение между стоком и истоком имеет такую полярность, чтобы основные носители двигались от истока к стоку. Механизм управления током в транзисторе заключается в следующем. Как известно из теории $p-n$ перехода, при увеличении обратного смещения на переходе ($U_{зи}$) область обедненного слоя бу-

Тип транзистора	С каналом n -типа		С каналом p -типа	
	Полярность напряжений	Вольт-амперная характеристика	Полярность напряжений	Вольт-амперная характеристика
С управляющим $p-n$ переходом				
МДП со встроенным каналом				
МДП с индуцированным каналом				

Рис. 20.7. Схемные обозначения и проходные вольт-амперные характеристики полевых транзисторов

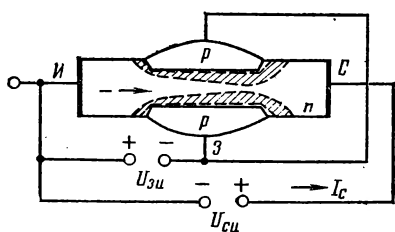


Рис. 20.8. Упрощенная структура полевого транзистора (с каналом n -типа) с управляющим p - n переходом

дет расширяться и распространяться в область полупроводника n -типа, поскольку для основных носителей в слоях всегда соблюдается условие $p_p \gg n_n$. Так как в обедненном слое практически отсутствуют свободные носители заряда, то электрический ток может быть только в проводящем канале, расположенном между обедненными слоями. Изменяя напряжение $U_{зи}$, можно изменять поперечное сечение проводящего канала, т. е. его проводимость, а следовательно, управлять током транзистора. Другими словами, полевой транзистор можно рассматривать как управляемый резистор. Если напряжение $U_{зи}$ достаточно велико, то происходит смыкание обедненных областей и ток транзистора станет равным нулю. Напряжение U_0 , при котором происходит перекрытие канала, называется напряжением отсечки. При нулевом напряжении на затворе (т. е. затвор и исток замкнуты) ток транзистора максимальный, $I_{с0}$ — ток насыщения стока (рис. 20.9, а), который практически не зависит от напряжения $U_{си}$ при условии $|U_{си}| > > |U_0|$.

Последнее объясняется тем, что в рабочем режиме канал не является эквипотенциальным вследствие того, что ток стока вызывает падение напряжения в самом канале, которое создает дополнительное обратное смещение на управляющем p - n переходе. Это способствует уменьшению проводимости канала, в результате чего увеличение напряжения $U_{си}$ не сопровождается пропорциональным увеличением тока стока (рис. 20.9, б). Более того, когда суммарное напряжение на p - n переходе $|U_{зи}| + |U_{си}|$ достигает $|U_0|$, канал почти перекрывается и при дальнейшем увеличении напряжения $U_{си}$ ток стока остается практически неизменным, как показано на рис. 20.9, б.

Ток насыщения $I_{с0}$ и напряжение отсечки U_0 зависят от геометрии прибора, физических параметров полупроводника и распределения примесей в канале.

Полевые транзисторы с изолированным затвором имеют структуру металл — диэлектрик — полупроводник (МДП-транзисторы). Схематически такая структура представлена на рис. 20.10. МДП-транзисторы могут изготавливаться либо на полупроводниковой, либо на диэлектрической подложке. В рассматриваемом случае подложкой служит кремний n -типа. Путем окисления кремния на поверхности подложки образуется тонкий изолирующий слой диэлектрика из двуокиси кремния SiO_2 . Через специальные отверстия в диэлектрике методом диффузии в подложке создаются две области с противоположными типами проводимости,

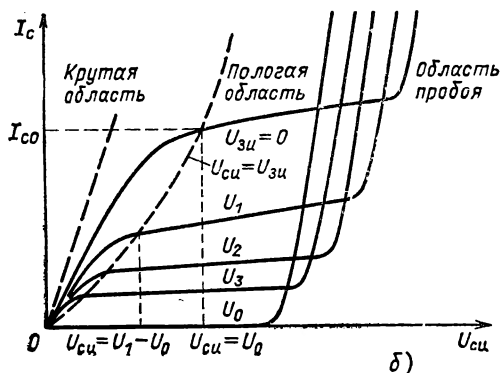
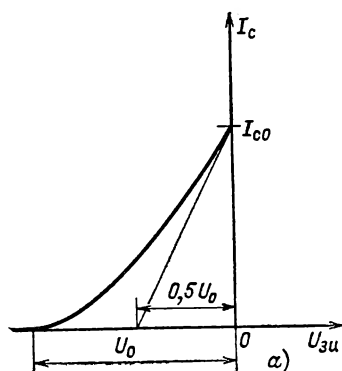


Рис. 20.9. Стокзатворная (а) и выходные (б) характеристики транзистора с управляющим p - n переходом

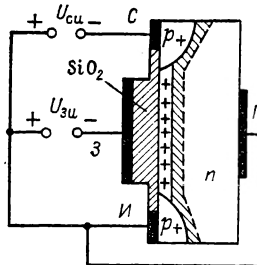


Рис. 20.10

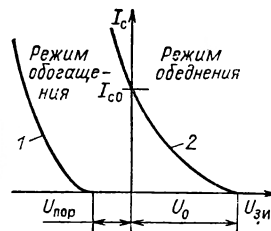


Рис. 20.11

Рис. 20.10. Структура МДП-транзистора

Рис. 20.11. Стокзатворные характеристики МДП-транзисторов с индуцированным (1) и встроенным (2) каналами

т. е. p -типа. Между областями p и n образуются два электронно-дырочных перехода. Одна из p -областей используется в качестве стока, а другая — истока. Подложку (ее вывод) обычно соединяют с истоком. Полярности приложенных напряжений при нормальном включении транзистора показаны на рис. 20.7. При напряжении $U_{зи} = 0$ ток стока будет пренебрежимо мал (ток утечки), так как сток p - n переход оказывается смещенным в обратном направлении.

При подаче на затвор отрицательного смещения электроны, находящиеся в подложке на границе с диэлектриком, вытесняются в

глубь полупроводника и в поверхностном слое подложки образуется проводящий канал p -типа. От подложки канал отделен изолирующим p - n переходом (обедненным слоем), смещенным в обратном направлении. Важно отметить, что канал индуцируется только при некотором пороговом значении напряжения $U_{\text{пор}}$. Увеличение напряжения на затворе ($|U_{\text{зи}}| > |U_{\text{пор}}|$) приводит к увеличению концентрации подвижных носителей (дырок) в канале, и ток стока возрастает. В результате стокзатворная вольт-амперная характеристика МДП-транзистора с индуцированным каналом будет иметь вид, показанный на рис. 20.11 (кривая 1).

Помимо МДП-транзисторов с индуцированным каналом изготавливаются МДП-транзисторы со встроенным каналом. Встроенный канал можно получить, например, путем диффузии примесей в подложку. В отличие от предыдущего в транзисторе со встроенным каналом ток стока не равен нулю при нулевом смещении на затворе (рис. 20.11, кривая 2). При подаче на затвор транзистора с каналом p -типа отрицательного смещения возрастает концентрация дырок в канале (режим обогащения) и ток стока увеличивается. При положительном смещении на затворе (режим обеднения) ток уменьшается и при напряжении отсечки U_0 становится равным нулю.

Стоковые характеристики МДП-транзисторов по виду подобны аналогичным характеристикам транзисторов с управляющим p - n переходом.

В отличие от биполярного транзистора полевой транзистор управляется напряжением и характеризуется аналогично электронной лампе следующей системой дифференциальных параметров:

крутизной характеристики

$$S = \left(\frac{\Delta I_c}{\Delta U_{\text{зи}}} \right)_{U_{\text{си}} = \text{const}; U_{\text{пи}} = \text{const}};$$

коэффициентом усиления транзистора

$$\mu_T = \left(- \frac{\Delta U_{\text{си}}}{\Delta U_{\text{зи}}} \right)_{I_c = \text{const}; U_{\text{пи}} = \text{const}};$$

внутренним сопротивлением транзистора

$$r_i = \left(\frac{\Delta U_{\text{си}}}{\Delta I_c} \right)_{U_{\text{зи}} = \text{const}; U_{\text{пи}} = \text{const}}.$$

Перечисленные параметры связаны между собой соотношением

$$\mu_T = S r_i.$$

Дифференциальные параметры транзистора приближенно можно определить из его статических характеристик.

Важным низкочастотным дифференциальным параметром полевого транзистора является входное сопротивление

$$r_{\text{вх}} = \left(\frac{\Delta U_{\text{зи}}}{\Delta I_z} \right)_{U_{\text{си}} = \text{const}; U_{\text{пи}} = \text{const}};$$

где ток затвора I_z для транзистора с p - n переходом определяется обратной ветвью вольт-амперной характеристики обратно смещенного p - n перехода. Сопротивление $r_{\text{вх}}$ таких транзисторов составляет 10^6 — 10^9 Ом. Для МДП-

транзисторов входное сопротивление определяется сопротивлением слоя диэлектрика и может достигать 10^9 — 10^{14} Ом.

Полевые транзисторы подвержены влиянию температуры в меньшей степени, чем биполярные.

Полевые транзисторы аналогично биполярным (см. рис. 20.5—20.6) могут включаться тремя различными способами: по схеме с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ). Обычно схема с общим затвором самостоятельного применения не имеет, а используется в качестве составной части более сложных схем (каскадов).

Приборы с зарядовой связью

На одной подложке методами интегральной технологии могут выполняться не только одиночные транзисторы, но и их группы (транзисторные сборки), а также совокупность таких МДП-структур, которые приобретают новые качества благодаря взаимодействию между собой. Приборы, основанные на взаимодействующих МДП-структурах, получили название приборов с зарядовой связью (ПЗС). Принцип действия ПЗС основан на том, что в каждой отдельной МДП-структуре можно создавать локальный заряд неосновных носителей (зарядовый пакет) и перемещать его вдоль поверхности подложки от одной структуры к другой. Конструктивно такой прибор выполняется в виде плотно скомпонованной совокупности МДП-транзисторов (рис. 20.10) на основе подложки n -типа, в поверхностном слое которой формируются p -области, и системы металлических электродов, отделенных от подложки слоем диэлектрика. Каждые две соседние p -области с металлическим электродом образуют транзистор; p -область является стоком одного и истоком другого (соседнего) транзистора, металлический электрод — затвором.

Зарядовый пакет, созданный под одним из затворов, обладает устойчивостью, поскольку дырки из него не могут уйти вследствие действия тормозящего поля на границах пакета. Время, в течение которого пакет существует, т. е. изменение заряда незначительно, составляет десятки миллисекунд. Наличие пакета изменяет состояние соответствующего транзистора. Основным режимом, в котором используются ПЗС, является режим направленного переноса зарядовых пакетов. С этой целью на соседние затворы подается система импульсных сигналов. Малые емкости приборов позволяют осуществлять перенос с большой скоростью (рабочая частота импульсных сигналов — десятки мегагерц). ПЗС нашли применение в схемах регистров сдвига и цифровых линиях задержки, причем входными сигналами могут быть как цифровые (дискретные), так и аналоговые напряжения.

Эквивалентные схемы биполярных транзисторов

Для расчета транзисторных устройств, в которых транзистор работает в режиме большого сигнала, применяются эквивалентные схемы замещения, приведенные на рис.

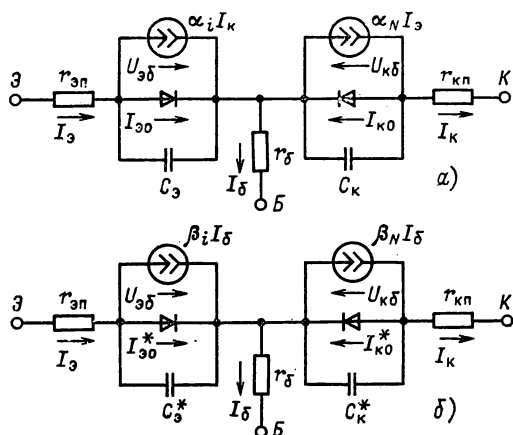


Рис. 20.12. Эквивалентные схемы биполярного транзистора при эмиттерном (а) и базовом (б) управлении

20.12, а, б. На рис. 20.12, а приведена эквивалентная схема при эмиттерном управлении (схема ОБ). Здесь эмиттерный и коллекторный переходы представлены в виде диодов, вольт-амперные характеристики которых описываются выражениями

$$I_{эд} = I_{э0} (e^{U_{эб}/\varphi_T} - 1);$$

$$I_{кд} = I_{к0} (e^{U_{кб}/\varphi_T} - 1),$$

где $I_{э0}$, $I_{к0}$ — тепловые токи изолированных переходов; $\varphi_T = kT/e$ — температурный потенциал, при 20 °C, равный 0,026 В.

Передача тока из эмиттера в коллектор и наоборот учитывается в эквивалентной схеме с помощью двух источников тока $\alpha_N I_3$ и $\alpha_i I_k$, где α_N и α_i — коэффициенты передачи токов соответственно эмиттера в коллектор и коллектора в эмиттер. Таким образом, диоды и источники тока моделируют процессы переноса заряда в базе транзистора. Дополнительные объемные сопротивления $r_{эп}$, $r_{кп}$, $r_{бп}$, введенные в схему, учитывают падения напряжения в толще полупроводника в соответствующей области. В отдельных случаях в схему вводят сопротивления утечки, шунтирующие $p-n$ переходы (на рис. 20.12 отсутствуют).

При управлении транзистором по базовому входу (схема ОЭ) целесообразно преобразовать эквивалентную схему транзистора так, чтобы она отражала управление базовым током, как показано на рис. 20.12, б. Здесь токи $\beta_N I_δ$, $\beta_i I_δ$ выражены через коэффициенты передачи тока базы соответственно в коллектор при прямом включении и в эмиттер при инверсном включении.

В преобразованной схеме тепловые токи переходов изменяются до значений

$$I_{э0}^* = I_{э0} (1 + \beta_i);$$

$$I_{к0}^* = I_{к0} (1 + \beta_N).$$

Приведенные выше эквивалентные схемы можно применять для расчета статических характеристик транзистора в любом режиме работы. В общем случае транзисторы могут

работать в четырех качественно различных режимах работы, которые характеризуются определенными полярностями напряжений на переходах транзистора:

1) в режиме отсечки токов (оба перехода смещены в обратном направлении)

$$U_{эб} < 0; \quad U_{кб} < 0 \text{ для } p-n-p \text{ структуры,}$$

$$U_{эб} > 0; \quad U_{кб} > 0 \text{ для } n-p-n \text{ структуры;}$$

2) в нормальном активном режиме (эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный — в обратном)

$$U_{эб} > 0; \quad U_{кб} < 0 \text{ для } p-n-p \text{ структуры,}$$

$$U_{эб} < 0; \quad U_{кб} > 0 \text{ для } n-p-n \text{ структуры;}$$

3) в режиме насыщения (оба перехода смещены в прямом направлении)

$$U_{эб} > 0; \quad U_{кб} > 0 \text{ для } p-n-p \text{ структуры,}$$

$$U_{эб} < 0; \quad U_{кб} < 0 \text{ для } n-p-n \text{ структуры;}$$

4) в инверсном активном режиме (эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный — в прямом)

$$U_{эб} < 0; \quad U_{кб} > 0 \text{ для } p-n-p \text{ структуры,}$$

$$U_{эб} > 0; \quad U_{кб} < 0 \text{ для } n-p-n \text{ структуры.}$$

Нормальный активный режим работы соответствует усилительному режиму работы транзистора и характеризуется системой физических параметров транзистора. В ключевом режиме работы транзистор может находиться в двух состояниях: закрытом — режим отсечки и открытом — режим насыщения.

Режим отсечки характеризуется весьма малыми значениями токов переходов транзистора. На рис. 20.13 приведены графики зависимости внешних токов транзистора от напряжения на эмиттерном переходе в режиме отсечки

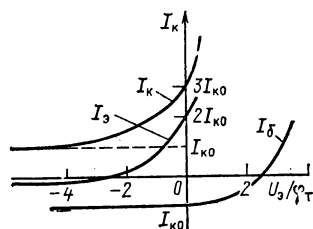


Рис. 20.13. Зависимости токов транзистора от напряжения на эмиттерном переходе в режиме отсечки

жения на эмиттерном переходе в режиме отсечки. Как видно из графиков, в режиме глубокой отсечки ($|U_{эб}| \gg \varphi_T$, $|U_{кб}| \gg \varphi_T$) токи транзистора практически могут быть выражены через тепловой ток коллекторного перехода:

$$I_k \approx I_{к0};$$

$$I_э \approx -\beta_i/\beta_N I_{к0};$$

$$I_б \approx -I_{к0}.$$

На границе отсечки и нормального активного режима

$$I_k \approx (1 + \beta_i) I_{к0};$$

$$I_э \approx \beta_i I_{к0};$$

$$I_б \approx -I_{к0}.$$

Сравнивая приведенные выражения, можно сделать вывод, что ток эмиттера на границе

отсечки существенно увеличивается и меняет знак, в то время как ток базы остается практически неизменным, что иллюстрируется кривыми, приведенными на рис. 20.13.

В режиме насыщения оба p - n перехода транзистора смещены в прямом направлении и напряжение на них не превышает 0,35–0,75 В. В этом режиме токи транзистора I_a , I_k , I_b можно считать заданными компонентами внешних цепей. Наряду с потенциальным критерием насыщения в инженерной практике часто применяют токовый критерий насыщения для нормального активного режима на границе с насыщением. На границе насыщения (при $U_{кб} = 0$) имеем $I_k = \alpha I_a$, отсюда для режима насыщения ($U_{кб} > 0$) токовый критерий

$$I_a > I_k / \alpha = I_{a,n},$$

где $I_{a,n}$ — эмиттерный ток на границе насыщения.

При управлении по базовому входу соответственно

$$I_b > I_k / \beta = I_{b,гр},$$

где $I_{b,гр}$ — граничное значение базового тока.

Для характеристики «глубины» насыщения вводится дополнительный параметр — степень насыщения:

$$N = \frac{I_{вх} - I_{вх,гр}}{I_{вх,гр}},$$

где $I_{вх,гр}$ — граничное значение тока насыщения для конкретной схемы управления (ОБ или ОЭ).

Помимо межэлектродных напряжений $U_{эб,н}$ и $U_{кб,н}$ насыщенного транзистора важной величиной в режиме насыщения является «остаточное» напряжение между коллектором и эмиттером $U_{кэ,н}$, которое существенно зависит от управляющего тока. В качестве приме-

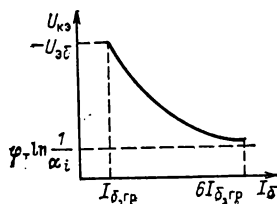


Рис. 20.14. Зависимость напряжения $U_{кэ}$ от управляющего тока

ра на рис. 20.14 приведен график зависимости остаточного напряжения идеализированного транзистора ($r_{э,л} = r_{к,л} = r_{б,н} = 0$) при включении его по схеме ОЭ.

Эквивалентные схемы, приведенные на рис. 20.12, в принципе можно применять не только для расчета статических режимов работы транзистора, но и для анализа переходных процессов. При этом необходимо учитывать комплексный характер параметров транзистора β_n и β_i , влияние емкостей электронно-дырочных переходов, а также паразитных межэлектронных емкостей. Инерционность транзистора прежде всего определяется процессами переноса неосновных носителей через область базы.

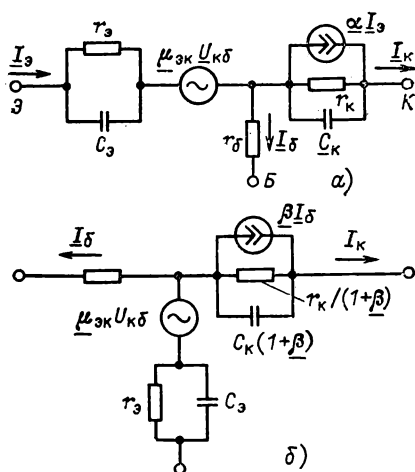


Рис. 20.15. Малосигнальные схемы замещения биполярного транзистора, включенного по схемам ОБ (а) и ОЭ (б)

Малосигнальные схемы замещения транзистора, полученные на базе эквивалентных схем для большого сигнала, приведены на рис. 20.15, а, б. Здесь эмиттерный переход представлен дифференциальным сопротивлением $r_{э}$. В коллекторную цепь введено дифференциальное сопротивление r_k , отражающее влияние модуляции толщины базы на коэффициенты передачи тока. Коэффициенты передачи тока α и β в эквивалентных схемах рис. 20.15 также представляют собой дифференциальные величины. Модуляция толщины базы при изменении коллекторного напряжения, имеющая место в транзисторе, приводит к изменению не только коэффициентов передачи тока, но также и напряжения на эмиттерном переходе. Другими словами, в транзисторе имеет место внутренняя обратная связь по напряжению, которая в эквивалентной схеме замещения учитывается генератором напряжения $\mu_{эк} U_{кб}$, включенного в эмиттерную цепь. В некоторых случаях внутренняя обратная связь учитывается путем включения фиктивного диффузионного сопротивления в базовую цепь последовательно с объемным сопротивлением базы $r_{б}$. Реактивные элементы $C_{э}$ и $C_{к}$ учитывают влияние токов заряда или разряда переходов в области высших частот. При анализе большинства практических схем влиянием емкости эмиттера можно пренебречь, тем самым упростив эквивалентную схему замещения.

Рассмотренные выше эквивалентные малосигнальные схемы замещения известны под названием Т-образных схем.

Транзистор можно представить и П-образными эквивалентными схемами замещения. Такие схемы иногда применяются для расчета некоторых радиотехнических устройств.

При усилении переменных сигналов малой амплитуды транзистор можно рассматривать как активный линейный четырехполюсник. Такой четырехполюсник удобно описывать системой h -параметров и представить в виде эквивалентной схемы, изображенной на рис. 20.16, где

ными межэлектродными емкостями. Емкости C_{pi} , C_{pe} представляют собой барьерные емкости соответствующих p - n переходов. В тех случаях, когда полевые транзисторы выпускаются в дискретном исполнении, у МПД-транзистора обычно подложку соединяют с истоком, а у транзистора с управляющим переходом подложку соединяют с затвором. Тогда эквивалентная схема замещения упрощается и выглядит, как показано на рис. 20.18.

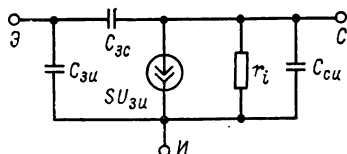


Рис. 20.18. Упрощенная эквивалентная схема полевого транзистора

Эквивалентные схемы замещения рис. 20.17 и 20.18 справедливы в широком диапазоне частот (до 50—100 МГц). В режиме большого сигнала для расчетов значений напряжений и токов в транзисторе в принципе можно использовать эквивалентную схему, приведенную на рис. 20.18, однако при этом надо учитывать нелинейную зависимость параметров схемы замещения от напряжений на электродах прибора. В большинстве случаев оказывается достаточным учесть только нелинейную зависимость статических параметров транзистора от режима работы. Межэлектродные емкости незначительно зависят от напряжений на выводах прибора, и при расчетах можно пользоваться их усредненными значениями. В режиме малого сигнала транзистор можно рассматривать как линейный четырехполюсник и характеризовать системой дифференциальных параметров, рассмотренных ранее.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускается большое количество биполярных и полевых транзисторов различных типов и назначения. Разработчику электротехнической аппаратуры приходится выбирать нужные ему по электрическим параметрам и эксплуатационным режимам транзисторы из большой номенклатуры.

Транзисторы выпускаются на мощности рассеяния от 20 мВт до 250 Вт с граничными частотами от 0,1 МГц до 8 ГГц, с максимально допустимыми напряжениями на переходах от 0,3 до 1500 В и выходными токами от 5 мА до 200 А, с уровнем собственных шумов от 3 до 20 дБ.

20.3. ТИРИСТОРЫ

Тиристоры относятся к классу так называемых переключающих полупроводниковых приборов. Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) этих приборов имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, который обусловлен сильной внутренней положительной обратной связью, возникающей при прохождении тока через структуру типа p - n - p с тремя электронно-

дырочными переходами. Вследствие этого тиристоры в зависимости от приложенного к ним напряжения и сопротивления внешней цепи могут находиться в двух устойчивых электрических состояниях: открытом (с большой проводимостью) и закрытом (с малой проводимостью).

Диодные тиристоры (динисторы) имеют два вывода от крайних областей структуры.

Схема устройства и включения диодного тиристора показана на рис. 20.19, а.

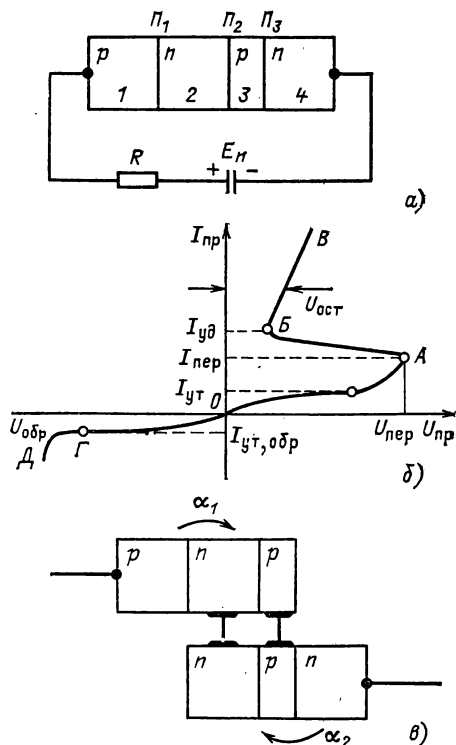


Рис. 20.19. Структура и схема включения (а), вольт-амперная характеристика (б) и двухтранзисторная модель (в) диодного тиристора (динистора)

Источник питания смещает переходы P_1 и P_3 в прямом направлении, а P_2 — в обратном. Когда динистор находится в закрытом состоянии, практически все приложенное к нему напряжение (оно называется прямым напряжением $U_{пр}$) падает на переходе P_2 .

Средние области 2 и 3 структуры имеют ширину, соизмеримую с диффузионными длинами неосновных носителей заряда. Поэтому дырки и электроны, инжектируемые переходами P_1 и P_3 , вследствие диффузии могут достигнуть центрального перехода P_2 . Ток перехода P_2 является суммой трех токов:

$$I_{P2} = I_{обр} + I_{P1} a_1 + I_{P3} a_2,$$

где $I_{обр}$ — обратный ток перехода P_2 ; $I_{P1} a_1$ — ток дырок, инжектированных переходом P_1 и достигших перехода P_2 ; $I_{P3} a_2$ — ток дырок, инжектированных переходом P_3 и достигших перехода P_2 .

Так как переходы включены последовательно, то токи переходов, а также ток I во внешней цепи равны между собой, т.е.

$$I_{П2} = I_{П3} = I,$$

откуда следует, что

$$I = \frac{I_{обр}}{1 - a_1 - a_2} = \frac{I_{обр}}{1 - a},$$

где $a = a_1 + a_2$, а через a_1 и a_2 обозначены соответственно доли дырок и электронов, инжектированных переходами $П_1$ и $П_3$ и достигших перехода $П_2$.

Обычно при анализе четырехслойной структуры ее условно представляют составленной из двух транзисторных структур: $p-n-p$ и $n-p-n$ (рис. 20.19, в). Тогда a_1 и a_2 называются коэффициентами передачи тока в схеме ОБ составляющих транзисторных структур.

В неявном виде последнее соотношение представляет собой выражение статической вольт-амперной характеристики динистора, так как $I_{обр}$, a_1 и a_2 зависят от напряжения на переходе $П_2$.

Зависимость $I_{обр}$, a_1 и a_2 от напряжения обусловлена главным образом умножением носителей заряда в электрическом поле перехода $П_2$, когда напряжение на нем U_2 близко к напряжению лавинного пробоя U_{π} . Коэффициент умножения M при этом равен

$$M = \frac{1}{1 - (U_2/U_{\pi})^n}.$$

Для электронов и дырок в кремнии $n \approx 3$.

Вольт-амперная характеристика динистора изображена на рис. 20.19, б. Спецификой ее является наличие участка AB с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Участок OA характеристики соответствует закрытому состоянию прибора. Ток прибора равен току утечки $I_{ут}$, значение которого может составлять от сотых долей микроампера до нескольких микроампер. Дифференциальное сопротивление структуры на этом участке положительно и обычно достигает сотен мегаом. При повышении температуры возрастает ток $I_{обр}$ и дифференциальное сопротивление уменьшается. Когда напряжение достигает напряжения переключения $U_{пер}$ (оно близко к напряжению лавинного или туннельного пробоя перехода $П_2$), ток динистора резко возрастает, а приращение тока не сопровождается изменением напряжения на переходе $П_2$. Дифференциальное сопротивление структуры становится равным нулю.

При дальнейшем увеличении тока (участок AB) положительным значениям приращений тока dI соответствуют отрицательные значения приращений dU . Дифференциальное сопротивление структуры на этом участке характеристики отрицательно.

Процесс возникновения отрицательного сопротивления в тиристоре происходит под влиянием положительной обратной связи в структуре, обеспечиваемой усилением составляющих транзисторов.

При некотором значении тока, равном току удержания $I_{уд}$, напряжение на переходе $П_2$ становится равным нулю.

Выключение динистора осуществляется путем уменьшения тока до значения ниже $I_{уд}$. При токе, большем $I_{уд}$, напряжение на переходе $П_2$ становится прямым и вычитается из суммы напряжений, падающих на переходах $П_1$ и $П_3$. Участок BB характеристики соответствует открытому состоянию динистора. Падение напряжения на нем называется остаточным напряжением $U_{ост}$ и составляет несколько десятых долей вольта.

В зависимости от конструкции сопротивление в открытом состоянии лежит в диапазоне от 0,001 Ом (для мощных приборов) до нескольких Ом (для маломощных). На участке BB переход $П_2$, смещенный в прямом направлении, инжектирует электроны и дырки навстречу потокам из переходов $П_1$ и $П_3$. Это соответствует режиму насыщения составляющих транзисторных структур.

Если к динистору приложено обратное напряжение $U_{обр}$, переход $П_2$ открыт, а переходы $П_1$ и $П_3$ закрыты. В этом состоянии в приборе имеет место обратный ток утечки $I_{обр}$. При увеличении $U_{обр}$ происходит пробой переходов $П_1$ и $П_3$ и ток в динисторе резко возрастает (участок $ГД$ характеристики). Максимальное обратное напряжение $U_{обр\max}$ определяется технологией изготовления переходов $П_1$ и $П_3$ и конструкцией прибора.

Триодные тиристоры кроме выводов от крайних областей (анода и катода) имеют также третий управляющий вывод от одной из средних (базовых) областей, как показано на рис. 20.20, а.

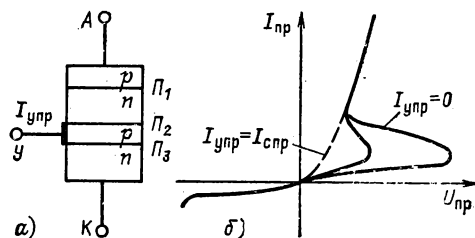


Рис. 20.20. Структура (а) и вольт-амперная характеристика (б) триодного тиристора

Ток перехода $П_3$ определяется управляющим током $I_{упр}$. Общий вид вольт-амперной характеристики показан на рис. 20.20, б.

Наличие управляющего тока приводит к тому, что напряжение включения тиристора уменьшается, так как условие включения его выполняется при более низком напряжении. При управляющем токе $I_{упр} = I_{спр}$ вольт-амперная характеристика спрямляется и тиристор сразу переходит в открытое состояние. В зависимости от типа тиристора ток спрямления $I_{спр}$ может составлять от нескольких микроампер до нескольких десятков миллиампер (для мощных приборов).

Быстродействие тириستоров принято характеризовать временем их включения τ_g и временем выключения τ_q . За время τ_g принимается интервал времени от начала действия управляющего импульса до момента времени, когда анодный ток нарастает до уровня 0,9

установившейся величины. Время включения главным образом зависит от инерционности составляющей транзисторной структуры с более широкой базой (обычно $p-n-p$) и несколько уменьшается при увеличении амплитуды тока управляющего импульса. Для маломощных тиристоров время включения τ_g составляет 1—10 мкс, а для тиристоров средней мощности и мощных — несколько десятков микросекунд.

За время выключения τ_q принимается минимальное время, в течение которого к тиристорному должно прикладываться запирающее напряжение (или он должен находиться в обесточенном состоянии), после чего тиристор запирается и к нему вновь может быть приложено прямое напряжение. Время выключения определяется процессом рекомбинации носителей заряда (дырок) в базе $p-n-p$ транзистора.

Значение $\tau_{\text{выкл}}$ составляет для маломощных тиристоров 10—30 мкс, для мощных достигает 100—200 мкс. Чем меньше τ_q , тем ниже напряжение U_g тиристора. Отношение $U_{\text{выкл}}/\tau_q$ обычно равно 140—330 В/мкс. Выключение триодных тиристоров, так же как и диристоров, как правило, производится за счет уменьшения анодного тока до значения ниже $I_{\text{уд}}$ на время не меньше τ_q . Некоторые тиристоры (называемые тиристорами, запираемыми по базе, или двухоперационными) могут выключаться при подаче запирающего импульса тока в базу. Амплитуда запирающего импульса значительно больше, чем $I_{\text{спр}}$. Например, для выключения анодного тока $I_{\text{пр}}=2$ А в управляющий электрод типичного запираемого тиристора средней мощности необходимо подать импульс тока 360 мА длительностью 50 мкс и напряжением 36 В ($I_{\text{спр}}$ и $U_{\text{спр}}$ для этого прибора равны 100 мА и 3 В соответственно).

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики триодного тиристора такая же, как и у диристора, и определяется главным образом свойствами перехода P_1 , так как переход P_2 , как правило, зашунтирован встроенным в структуру резистором. Для обратной ветви задаются $U_{\text{обр max}}$ и обратный ток утечки $I_{\text{ут,обр}}$.

Тиристоры средней и большой мощности чаще всего изготавливаются методом диффузии или сплавления-диффузии.

На рис. 20.21 показана вольт-амперная характеристика симметричного тиристора.

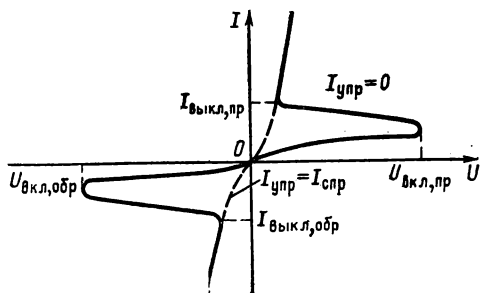


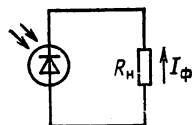
Рис. 20.21. Вольт-амперная характеристика симметричного тиристора

20.4. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Вентильные фотоэлементы и фотодиоды

В отличие от фоторезисторов, способных изменять ток в цепи независимого источника электрической энергии, вентильные фотоэлементы и фотодиоды сами создают ЭДС, зависящую от освещенности. Действие этих приборов основано на фотогальваническом эффекте (см. разд. 3), который в присутствии $p-n$ перехода приводит к неравномерному распределению по объему полупроводника генерируемых светом электронов и дырок. Поглощение кванта световой энергии сопровождается одновременным появлением пары — электрона и дырки. Носители заряда, которые являются основными в данной области полупроводника, не могут преодолеть потенциальный барьер $p-n$ перехода и увеличивают ее проводимость. Несомненные же носители, приблизившись к $p-n$ переходу, увлекаются его полем и перемещаются в другую область полупроводника, где оказываются основными. Таким образом, в результате освещения полупроводника с $p-n$ переходом возрастает концентрация электро-

Рис. 20.22. Схема включения фотодиода



нов в n -области и дырок в p -области, что и приводит к появлению фото-ЭДС. Схема включения фотодиода приведена на рис. 20.22.

Фототранзисторы

Биполярный фототранзистор имеет структуру, аналогичную структуре обычного биполярного транзистора, но конструктивно выполняется так, что область базы, проецирующаяся на коллекторный $p-n$ переход, может быть освещена со стороны, на которой расположен эмиттер (рис. 20.23, а).

Такой прибор эквивалентен обычному биполярному транзистору, между выводами коллектора и базы которого подключен фотодиод (рис. 20.23, б). Ток фотодиода оказывается током базы биполярного транзистора и создает в цепи коллектора этого транзистора усиленный в β раз ток.

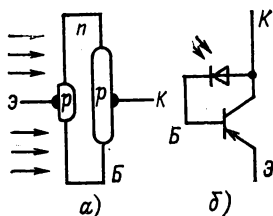


Рис. 20.23. Структура (а) и схематическое изображение (б) биполярного фототранзистора

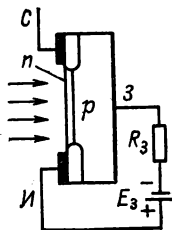


Рис. 20.24. Структура полевого фототранзистора

Полевой фототранзистор представляет собой полевой транзистор со встроенным каналом на полупроводниковой подложке с противоположным типом электропроводности (рис. 20.24), у которого отсутствует основной затвор, а лежащая на открытой поверхности область канала доступна для освещения.

Оптроны. Светоизлучающие приборы

Оптрон (оптопара) — прибор, внутри которого происходит преобразование электрического сигнала в оптический и обратно. На внешних выводах этого прибора мы имеем лишь электрические сигналы в чистом виде. Источником света в оптопарах является, как правило, светоизлучающий диод на основе арсенид-галлий-алюминия или ему подобный, приемником и преобразователем оптического сигнала в электрический — фоторезистор, кремниевые фотодиод, фототранзистор или фототристор.

Излучающие свет твердотельные приборы можно разделить на две группы источников: когерентного и некогерентного света. К первой группе относятся полупроводниковые лазеры (полупроводниковые квантовые генераторы), ко второй — светоизлучающие диоды.

зрения частотных и мощностных свойств:

малой мощности (до 0,3 Вт) с граничной частотой коэффициента передачи тока (частотой, при которой коэффициент передачи тока α уменьшается в $\sqrt{2}$ раз): 1 — не более 3 МГц; 2 — от 3 до 30 МГц, 3 — более 30 МГц;

средней мощности (от 0,3 до 1,5 Вт) с граничной частотой коэффициента передачи тока: 4 — не более 3 МГц; 5 — от 3 до 30 МГц, 6 — более 30 МГц;

большой мощности (более 1,5 Вт) с граничной частотой передачи тока: 7 — не более 3 МГц, 8 — от 3 до 30 МГц, 9 — более 30 МГц.

Четвертый и пятый элементы обозначения указывают на порядковый номер разработки данного типа транзистора.

Шестой элемент обозначения (буквы от А до Я) показывает разделение транзисторов данного типа на группы (подтипы) по классификационным параметрам. Например, транзистор КТ 903А — кремниевый, биполярный, мощный, высокочастотный, номер разработки 0,3, группа А с классификационным параметром $h_{21э}$ от 15 до 70.

Ниже приведены некоторые параметры ряда биполярных транзисторов, выпускаемых отечественной промышленностью.

Обозначение прибора	Материал, структура	$f h_{21э}$, МГц	$U_{кэ max}$, В	$I_{к max}$, мА	$h_{21э}$	Цена, руб.
ГТ109А	Ge, <i>p-n-p</i>	1	6	20	20—50	0,40
КТ201А	Si, <i>n-p-n</i>	10	20	20	20—60	0,40
КТ209А	Si, <i>p-n-p</i>	5	15	300	20—60	0,20
КТ312А	Si, <i>n-p-n</i>	80	20	30	10—100	—
КТ355А	Si, <i>n-p-n</i>	1500	15	30	80—300	—
ГТ403А	Ge, <i>p-n-p</i>	8	30	1250	30—50	—
КТ603Е	Si, <i>n-p-n</i>	200	10	300	60—200	0,25
КТ630А	Si, <i>p-n-p</i>	50	120	1000	40—120	0,67
ГТ703А	Ge, <i>p-n-p</i>	0,01	20	3500	30—70	—
КТ809А	Si, <i>n-p-n</i>	5,25	400	3000	15—100	1,00
КТ903А	Si, <i>n-p-n</i>	120	60	3000	15—70	—

20.5. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Классификация современных полупроводниковых приборов по их назначению, физическим свойствам, основным электрическим параметрам, конструктивно-технологическим признакам, роду исходного полупроводникового материала находит отражение в системе обозначений их типов.

Классификация транзисторов отражена в их условном обозначении (маркировке) и содержит определенную информацию об их свойствах (ГОСТ 10862-77). В зависимости от назначения и используемого при изготовлении транзистора полупроводникового материала в его обозначении указывается соответствующая буква или цифра — первый элемент: германий — Г или 1, кремний — К или 2, арсенид галлия — А или 3.

Второй элемент обозначения (буква Т или П) определяет принадлежность транзистора соответственно к биполярным или полевым приборам. Третий элемент обозначения определяет назначение транзистора с точки

Система обозначений полупроводниковых диодов, тиристоров и оптоэлектронных приборов установлена отраслевым стандартом ОСТ 11336, 038-77 и базируется на ряде классификационных признаков этих приборов.

В основу системы обозначений положен семизначный буквенно-цифровой код, первый элемент которого (буква — для приборов широкого применения, цифра — для приборов, используемых в устройствах специального назначения) обозначает исходный полупроводниковый материал. Второй элемент обозначения — буква определяет подкласс приборов, третий элемент — цифра (или буква для оптопар) определяет один из основных характеризующих прибор признаков (параметр, название или принцип действия). Четвертый, пятый (и шестой) элементы — двухзначное (трехзначное) число, обозначающее порядковый номер разработки технологического типа прибора, последний элемент — буква условно определяет классификацию по параметрам приборов, изготовленных по единой технологии.

Для обозначения исходного материала используются следующие символы (первый элемент обозначения):

Г или 1 — для германия или его соединений;

К или 2 — для кремния или его соединений;

А или 3 — для соединений галлия;

И или 4 — для соединений индия.

Для обозначения подклассов приборов используется одна из следующих букв (второй элемент обозначения): Д — для диодов выпрямительных, импульсных, магнитодиодов, термодиодов; Ц — выпрямительных столбов и блоков; В — варикапов; И — туннельных диодов; А — сверхвысокочастотных диодов; С — стабилитронов; Г — генераторов шума; Л — излучающих оптоэлектронных приборов; О — оптопар; У — триодных тиристоров.

Для обозначения наиболее характерного признака прибора используются следующие символы применительно к различным подклассам приборов (третий элемент обозначения).

Диоды (подкласс Д)

1 — для выпрямительных диодов с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;

2 — для выпрямительных диодов с постоянным или средним значением прямого тока от 0,3 до 10 А;

3 — для магнитодиодов и термодиодов;

4 — для импульсных диодов с временем восстановления обратного сопротивления более 500 нс;

5 — для импульсных диодов с временем восстановления от 150 до 500 нс;

6 — для импульсных диодов с временем восстановления от 30 до 150 нс;

7 — для импульсных диодов с временем восстановления от 5 до 30 нс;

8 — для импульсных диодов с временем восстановления от 1 до 5 нс;

9 — для импульсных диодов с эффективным временем жизни неосновных носителей заряда менее 1 нс.

Выпрямительные столбы и блоки (подкласс Ц)

1 — для столбов с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;

2 — для столбов с постоянным или средним значением прямого тока от 0,3 до 10 А;

3 — для блоков с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;

4 — для блоков с постоянным или средним значением прямого тока от 0,3 до 10 А.

Стабилитроны (подкласс С)

1 — для стабилитронов мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;

2 — для стабилитронов мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации от 10 до 100 В;

3 — для стабилитронов мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В;

4 — для стабилитронов мощностью от 0,3

до 5 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;

5 — для стабилитронов мощностью от 0,3 до 5 Вт с номинальным напряжением стабилизации от 10 до 100 В;

6 — для стабилитронов мощностью от 0,3 до 5 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В;

7 — для стабилитронов мощностью от 5 до 10 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;

8 — для стабилитронов мощностью от 5 до 10 Вт с номинальным напряжением стабилизации от 10 до 100 В.

9 — для стабилитронов мощностью от 5 до 10 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В.

Оптроны (подкласс О)

Р — для резисторных оптопар;

Д — для диодных оптопар;

У — для тиристорных оптопар;

Т — для транзисторных оптопар.

Триодные тиристоры малой мощности (подкласс У)

Незапираемые тиристоры

1 — для тиристоров с максимально допустимым значением среднего тока в открытом состоянии не более 0,3 А или с максимально допустимым значением импульсного тока в открытом состоянии не более 15 А;

2 — для тиристоров с максимально допустимым значением среднего тока в открытом состоянии от 0,3 до 10 А или с максимально допустимым значением импульсного тока в открытом состоянии от 15 до 100 А;

7 — для тиристоров с максимально допустимым значением среднего тока в открытом состоянии более 10 А или с максимально допустимым значением импульсного тока в открытом состоянии более 100 А.

Запираемые тиристоры

3, 4, 8 — то же, что и 1, 2, 7 соответственно для незапираемых тиристоров.

Симметричные тиристоры

5, 6, 9 — то же, что и 1, 2, 7 соответственно для незапираемых тиристоров.

Излучающие оптоэлектронные приборы (подкласс Л)

Источники инфракрасного излучения

1 — для излучающих диодов;

2 — для излучающих модулей.

Приборы визуального представления информации

3 — для светозлучающих диодов;

4 — для знаковых индикаторов;

5 — для знаковых табло;

6 — для шкал;

7 — для экранов.

Таким образом, современная система обозначений позволяет по типу прибора получить

значительный объем информации о свойствах прибора. И, наоборот, зная требования, предъявляемые к прибору, легко определить необходимый буквенно-цифровой код проводникового элемента. Однако следует иметь в виду, что до сих пор в обращении находятся приборы, система обозначения которых соответствует ГОСТ 10862-64, действовавшему до 1973 г., и даже приборы, разработанные до 1964 г. В подобных случаях необходимо обращаться к справочникам по полупроводниковым приборам (например, под общей ред. Н. Н. Горюнова. М.: Энергоиздат, 1982. 744 с.).

Для примера ниже приведены параметры некоторых типов полупроводниковых диодов.

ДЧ, ВЧ

обратного напряжения — от 3 до 30 руб.

— выпрямительные диоды с малым временем восстановления вентильных свойств при приложении обратного напряжения и предназначенные для работы при повышенной частоте. Средний ток — от 80 А (ДЧ 151.80) до 1000 А (ДЧ 143—1000). Обратное напряжение — от 500 до 1800 В, прямое падение не превышает 1,8—3 В для равных типов, цена в зависимости от среднего тока и обратного напряжения — от 7 до 80 руб.

Выпрямительные диоды

Обозначение прибора	$U_{обр\max}$, В	$I_{пр,ср\max}$	$U_{пр}$, В	$I_{обр}$ при $U_{обр\max}$, мкА	Материал	Цена, руб.
Д9В	30	20	1	250	Ge	0,20
Д102	50	30	2	10	Si	0,30
КД103А	50	100	1	1	Si	0,50
Д207	200	100	1	50	Si	0,50
КД104А	300	10	1	3	Si	—
Д210	500	100	1	50	Si	0,50
КД210В	1000	5000	1	4500	Si	0,20

Импульсные диоды

Обозначение прибора	$U_{обр\max}$, В	$t_{вос}$, нс	C_d , пФ	$I_{обр}$ при $U_{обр\max}$, мкА	$I_{пр\max}$, мА	Материал	Цена, руб.
КД512А	15	1	1	5	20	Si	0,50
КД509А	50	4	4	5	100	Si	0,50
Д312А	75	500	3	100	500	Ge	0,50
Д220Б	100	500	15	1	500	Si	0,50

Стабилитроны кремниевые

Обозначение прибора	$\Delta U_{ст}$, % или В	$U_{ст}$, В	$I_{ст}$, мА	$P_{\max}$, мВт	Материал	Цена, руб.
КС133А	10 %	3,3	10	300	Si	0,20
КС170А	0,35 В	7	10	150	Si	0,30
КС215Ж	1,5 В	15	2	125	Si	0,30
КС680А	15 %	180	25	5000	Si	0,50

Силовые выпрямительные диоды

В10—В320 — выпрямительные диоды на средний ток соответственно от 10 до 320 А; обратное напряжение — от 150 до 1600 В; прямое падение — не более 1,35 В. Цена в зависимости от среднего тока и обратного напряжения — от 2,2 до 12,5 руб.

В2—1600 — выпрямительные диоды на средний ток от 320 до 1600 А, обратное напряжение 150—3000 В, прямое падение 1,8 В. Цена в зависимости от среднего тока и обратного напряжения — от 12 до 120 руб.

ДЛ, ВЛ — лавинные выпрямительные диоды на средний ток от 10 А (ВЛ-10) до 500 А (ДЛ-500). Обратное напряжение — от 600 до 1200 В, прямое падение — не более 1,35—1,5 В. Цена в зависимости от среднего тока и

Более детально о силовых диодах см. разд. 32 настоящего справочника.

Силовые тиристоры

Силовые тиристоры общепромышленного применения (Т) выпускаются на токи от 10 А (Т112-10) до 1250 А (Т173-1250). Допустимое повторяющееся напряжение в закрытом состоянии и допустимое обратное — от 100 до 3200 В, прямое падение — около 2 В; критическая скорость нарастания прямого напряжения в закрытом состоянии — от 20 до 1000 В/мкс; критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии 20—200 А/мкс; время выключения — от 6—8 мкс для тиристоров на малые токи до 250—500 мкс для тиристоров на большие токи. Цена в зависимости от среднего тока и обратного напряжения — от 3 до 150 руб.

Быстродействующие тиристоры (ТБ) выпускаются на токи от 50 А (ТБ151-50) до 1000 А (ТБ253-1000). Допустимое повторяющееся обратное напряжение — от 300 до

1400 В, прямое падение — около 2,5 В, критическая скорость нарастания прямого напряжения в закрытом состоянии — от 100 до 1000 В/мкс, критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии — от 100 до 800 А/мкс, время выключения 20—60 мкс. Цена в зависимости от среднего тока и обратного напряжения — от 10 до 200 руб.

Лавинные тиристоры (ТЛ) выпускаются на токи от 160 до 320 А. Напряжение — от 400 до 1100 В, прямое падение — около 2 В, критическая скорость нарастания напряжения — до 1000 В/мкс, тока 40—100 А/мкс, время выключения 70—250 мкс. Цена — от 13 до 30 руб.

Высокочастотные тиристоры (ТЧ) выпускаются на токи от 25 до 125 А. Напряжение — от 300 до 1100 В, прямое падение — около 3 В, критическая скорость нарастания напряжения 100—500 В/мкс, тока 100—200 А/мкс, время выключения 12—30 мкс. Цена — от 10 до 20 руб.

Симметричные тиристоры (симисторы, ТС) выпускаются на токи от 10 до 320 А. Напряжение — от 100 до 1200 В, прямое падение 1,5—2 В, критическая скорость нарастания напряжения 10—1000 В/мкс, тока 5—70 А/мкс, время выключения 70—250 мкс. Цена — от 10 до 30 руб.

Более детальные сведения о тиристорах приведены в разд. 32 настоящего справочника.

По принятой системе условных обозначений [8] все выпускаемые отечественные интегральные микросхемы (ИС) делятся по конструктивно-технологическому исполнению на три группы: 1, 5, 6, 7 — полупроводниковые; 2, 4, 8 — гибридные; 3 — прочие (пленочные, вакуумные, керамические и т. п.).

Условное обозначение типа интегральной микросхемы состоит из четырех элементов. Первый — цифра, обозначающая группу ИС; второй — три (от 000 до 999) или две (от 00 до 99) цифры, обозначающие порядковый номер серии микросхем. Таким образом, первые цифры, образованные двумя элементами, определяют полный номер серии ИС. Третий элемент — две буквы, соответствующие подгруппе и виду (табл. 20.2); четвертый — условный номер ИС по функциональному признаку в данной серии.

Иногда в конце условного обозначения добавляется буква, определяющая технологический разброс электрических параметров данного типонаминала. Конечная буква при маркировке может быть заменена цветной точкой. Цвет маркировочной точки указывается в технических условиях на микросхемах конкретных типов. Кроме того, в некоторых сериях перед условным обозначением указываются различные буквы, характеризующие условия приемки этих серий и особенности конструктивного исполнения.

20.6. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Операционный усилитель (ОУ) служит основой для построения схем, выполняющих различные функции. Первоначально ОУ были разработаны для выполнения линейных операций:

Т а б л и ц а. 20.2. Классификация интегральных микросхем

Подгруппа и вид ИС по функциональному назначению	Обозначение
Генераторы:	
гармонических сигналов	ГС
прямоугольных сигналов (автоколебательные мультивибраторы, блокинг-генераторы и др.)	ГГ
линейно изменяющихся сигналов	ГЛ
сигналов специальной формы	ГФ
шума	ГМ
прочие	ГП
Фоточувствительные схемы с зарядовой связью:	
матричные	ЦМ
линейные	ЦЛ
прочие	ЦП
Детекторы:	
амплитудные	ДА
импульсные	ДИ
частотные	ДС
фазовые	ДФ
прочие	ДП
Коммутаторы и ключи:	
тока	КТ
напряжения	КН
прочие	КП
Логические элементы	
И	ЛИ
НЕ	ЛН
ИЛИ	ЛЛ
И—НЕ	ЛА
ИЛИ—НЕ	ЛЕ
И—ИЛИ	ЛС
И—НЕ/ИЛИ—НЕ	ЛБ
И—ИЛИ—НЕ	ЛР
И—ИЛИ—НЕ/И—ИЛИ	ЛК
ИЛИ—НЕ/ИЛИ	ЛМ
расширители	ЛД
прочие	ЛП
Многофункциональные схемы (схемы, выполняющие одновременно несколько функций):	
аналоговые	ХА
цифровые	ХЛ
комбинированные	ХК
прочие	ХП
Модуляторы:	
амплитудные	МА
частотные	МС
фазовые	МФ
импульсные	МИ
прочие	МП
Наборы элементов:	
диодов	НД
транзисторов	НТ
резисторов	НР
конденсаторов	НЕ
комбинированные	НК
функциональные (в том числе матрицы резисторов типа R—2R)	НФ
прочие	НП
Преобразователи сигналов:	
частоты (в том числе перемножители аналоговых сигналов)	ПС
длительности	ПД
напряжения (тока)	ПН
мощности	ПМ
уровня (согласователи)	ПУ
аналого-цифровые	ПА
цифро-аналоговые	ПВ
код-код	ПР
синтезаторы частот	ПЛ
делители частоты аналоговые	ПК
умножители частоты аналоговые	ПЕ
прочие	ПП
Схемы источников вторичного питания:	
выпрямители	ЕВ
преобразователи	ЕМ
стабилизаторы напряжения непрерывные	ЕН
стабилизаторы напряжения импульсные	ЕК
стабилизаторы тока	ЕТ
схемы управления импульсными стабилизаторами напряжения	ЕУ
системы источников вторичного питания	ЕС
прочие	ЕП

Продолжение табл. 20.2

Подгруппа и вид ИС по функциональному назначению	Обозначение
Схемы задержки: пассивные активные прочие	БМ БР БП
Схемы сравнения: амплитудные (сравнение уровня сигналов) временные частотные компараторы напряжения прочие	СА СВ СС СК СП
Триггеры: : универсальные (типа JK) с раздельным запуском (типа RS) с задержкой (типа D) счетные (типа Т) динамические Шмитта комбинированные (типов DT, RST и т. п.) прочие	ТВ ТР ТМ ТТ ТД ТЛ ТК ТП
Усилители: высокой частоты ¹ промежуточной частоты ¹ низкой частоты ¹ широкополосные (в том числе видеоусилители) импульсных сигналов повторители считывания и воспроизведения индикации постоянного тока ¹ операционные ¹ дифференциальные прочие	УВ УР УН УК УИ УЕ УЛ УМ УТ УД УС УП
Фильтры: верхних частот нижних частот полосовые режекторные прочие	ФВ ФН ФЕ ФР ФП
Формирователи: импульсов прямоугольной формы (одновибраторы, блокинг-генераторы и др.) импульсов специальной формы адресных токов ² разрядных токов ² прочие	АГ АФ АА АР АП
Схемы запоминающих устройств: матрицы оперативных запоминающих устройств матрицы постоянных запоминающих устройств оперативные запоминающие устройства постоянные запоминающие устройства с возможностью однократного программирования постоянные запоминающие устройства (масочные) запоминающие устройства на ЦМД постоянные запоминающие устройства с возможностью многократного электрического программирования постоянные запоминающие устройства с ультрафиолетовым стиранием и электрической записью информации ассоциативные запоминающие устройства прочие	РМ РВ РУ РТ РЕ РЦ РР РФ РА РП

Продолжение табл. 20.2

Подгруппа и вид ИС по функциональному назначению	Обозначение
Схемы цифровых устройств: регистры сумматоры полусумматоры счетчики шифраторы дешифраторы комбинированные арифметико-логические устройства прочие	ИР ИМ ИЛ ИЕ ИВ ИД ИК ИА ИП
Схемы вычислительных средств: микро-ЭВМ микропроцессоры микропроцессорные секции схемы микропрограммного управления функциональные расширители (в том числе расширители разрядности данных) схемы синхронизации схемы управления прерыванием схемы управления вводом-выводом (схемы интерфейса) схемы управления памятью функциональные преобразователи информации (арифметические, тригонометрические, логарифмические, быстрого преобразования Фурье и др.) схемы сопряжения с магистралью времязадающие схемы микрокалькуляторы контроллеры комбинированные схемы прочие	ВЕ ВМ ВС ВУ ВР ВБ ВН ВВ ВТ ВФ ВА ВИ ВХ ВГ ВК ВП

¹ Усилители напряжения и мощности (в том числе маломощные).

² Формирователи напряжения или тока.

усиления сигнала, алгебраического суммирования нескольких сигналов, преобразования сопротивлений, интегрирования и дифференцирования. Однако они оказались удобными и для выполнения таких функций, в которых используются нелинейные свойства: ограничение сигнала, сравнение уровней двух сигналов, замыкание и размыкание цепей, связанных с выходом ОУ. На основе нелинейных свойств ОУ выполняются компараторы, формирователи импульсов, импульсные генераторы, генераторы гармонического, линейно изменяющегося напряжения. Такое богатство функциональных возможностей привело к тому, что выпуск интегральных ОУ непрерывно растет, они являются перспективным классом интегральных схем, и их целесообразно использовать в разработках устройств управления и преобразования информации.

Всякий ОУ (в дальнейшем будем иметь в виду интегральные ОУ) представляет собой конструктивный элемент, имеющий следующие

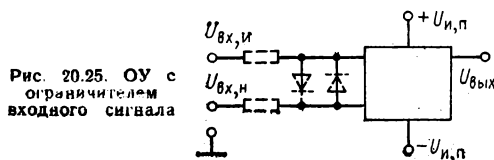


Рис. 20.25. ОУ с ограничителем входного сигнала

выводы: общий вывод, положительный и отрицательный выводы питания, два входных вывода и один выходной (рис. 20.25). У некоторых ОУ имеются и другие выводы, выполняющие вспомогательные функции.

Основные параметры ОУ

Коэффициент усиления напряжения — отношение приращений выходного и входного напряжений. Входное измеряется между двумя входами либо между одним входом и общим выводом при неизменном потенциале второго входа. Один из входов ОУ — инвертирующий, он изменяет фазу входного сигнала на противоположную, второй — неинвертирующий (прямой):

$$K_{\text{и}} = -U_{\text{вых}}/U_{\text{вх,и}}; \quad K_{\text{н}} = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх,н}}.$$

Усилители выполняются симметричными, т. е.

$$|K_{\text{и}}| = K_{\text{н}} = K.$$

Типичные значения K — в пределах 10^3 — 10^5 .

Входное сопротивление $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$ измеряется для одного из входов при неизменном потенциале другого. Оно характеризует, в какой мере входная цепь усилителя нагружает источник входного сигнала. Идеальным следует считать такой усилитель, который имеет $R_{\text{вх}} = \infty$; на практике $R_{\text{вх}} = 10^3 \div 10^6$ Ом, для прецизионных усилителей 10^{10} Ом.

Входное сопротивление для синфазного сигнала $R_{\text{сф}} = U_{\text{сф}}/I_{\text{сф}}$ — отношение приращения напряжения на обоих соединенных между собой входах по отношению к общему выводу к приращению среднего входного тока:

$$R_{\text{сф}} \gg R_{\text{вх}}.$$

Средний $I_{\text{вх}}$ и разностный $\Delta I_{\text{вх}}$ входные токи измеряются в режиме, когда выходное напряжение становится равным нулю:

$$I_{\text{вх}} = (I_{\text{и}} + I_{\text{н}})/2; \quad \Delta I_{\text{вх}} = |I_{\text{и}} - I_{\text{н}}|.$$

У идеального усилителя $I_{\text{вх}} = 0$; на практике оба тока не превышают единиц микроампер. Так как

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх,н}} K_{\text{н}} + U_{\text{вх,и}} K_{\text{и}} = K(U_{\text{вх,и}} - U_{\text{вх,н}}),$$

то одинаковые по фазе (синфазные) сигналы на обоих входах практически не влияют на выходное напряжение: $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх,сф}}(K_{\text{н}} + K_{\text{и}}) = U_{\text{вх,сф}}K_{\text{п,сф}}$. Коэффициент ослабления синфазного сигнала — отношение коэффициента усиления к коэффициенту передачи синфазного сигнала $K_{\text{п,сф}}$ — составляет 10^3 — 10^5 .

Выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ показывает, насколько выходная цепь ОУ отличается от идеального источника ЭДС. У идеального усилителя $R_{\text{вых}} = 0$, на практике это сопротивление составляет 10^2 — 10^3 Ом, но всегда

$$R_{\text{вых}} \ll R_{\text{вх}}.$$

Выходное напряжение ОУ не может быть выше, чем положительное напряжение питания; и ниже, чем отрицательное. На практике $|U_{\text{вых}}| \leq (0,5 \div 0,8) |U_{\text{и,п}}|$, где $U_{\text{и,п}}$ — напряжение источника питания.

Из-за несовершенства усилителя его выходное напряжение может отличаться от нуля, когда $U_{\text{вх}} = 0$. Для приведения к нулю выхода на вход должно быть подано напряжение смещения $U_{\text{см}}$. Это напряжение и его температурный дрейф указаны в паспорте. Основные данные наиболее распространенных ОУ приведены в табл. 20.3.

Для ограничения входного напряжения между входами часто присоединяют встречно-параллельные кремниевые диоды и резисторы (пунктир на рис. 20.25).

Обратные связи в ОУ

Свойства усилителей, в том числе ОУ, можно изменять, вводя обратную связь, т. е. подавая на входы усилителя сумму входного и части выходного сигналов. ОУ используется обычно с отрицательной обратной связью (рис. 20.26). Вследствие этого коэффициент усиления

$$K_{\text{о,с}} = -U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} < K.$$

Учитывая также, что $K \gg 1$, можно считать, что

$$U \ll U_{\text{вых}}; \quad U \ll U_{\text{вх}}.$$

Таблица 20.3

Параметр	К140УД1А	К140УД1Б	К140УД1В	К140УД7	К140УД13	К553УД1А	К553УД2
$U_{\text{и,п1}}$, В	+6,3	+12,6	+12,6	+15	+15	+15	+15
$U_{\text{и,п2}}$, В	−6,3	−12,6	−12,6	−15	−15	−15	−15
K	500—4500	1350—12 000	8000	30 000	10	$15 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$
$I_{\text{вх}}$, мкА, не более	7,0	9,0	9,0	0,2	$0,2 \cdot 10^{-3}$	1,5	1,5
$U_{\text{см}}$, мВ, не более	$\pm 17,0$	$\pm 17,0$	$\pm 17,0$	$\pm 0,9$	$\pm 0,05$	$\pm 7,5$	$\pm 7,5$
$\Delta I_{\text{вх}}$, мкА, не более	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2 \cdot 10^{-3}$	0,5	0,5
$U_{\text{вых}}$, В, не менее	$\pm 2,8$	+6,0; −5,7	+6,0; −5,7	—	—	± 10	± 10
$U_{\text{вх}}$, В, не более	$\pm 1,2$	$\pm 1,2$	$\pm 1,2$	$\pm 1,2$	± 10	± 8	± 12
$I_{\text{вых}}$, мА, не более	0,9	0,9	0,9	—	—	—	—
Цена, руб.	0—39	0—60	—	1—20	—	—	—

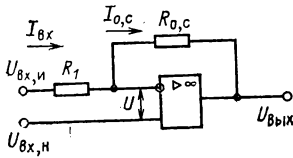


Рис. 20.26. ОУ с отрицательной обратной связью

Тогда

$$I_{вх} = I_{0,с} = \frac{U_{вх}}{R_1} = -\frac{U_{вых}}{R_{0,с}};$$

$$K_{0,с} = \frac{R_{0,с}}{R_1}.$$

Таким образом, при выполнении неравенств $K_{0,с}$ не зависит от параметров усилителя и полностью определяется параметрами внешней цепи. На выбор $R_{0,с}$ и R_1 накладываются следующие ограничения: $R_{0,с}$ ограничено сверху значением, при котором $I_{0,с} \gg I$, а снизу — допустимой нагрузкой усилителя на выходе; практически $R_{0,с} \leq 1$ МОм; R_1 ограничено снизу допустимой нагрузкой для источника сигнала, практически $R_1 \geq 5$ КОм. Входное сопротивление усилителя

$$R_{вх,0,с} = R_1;$$

выходное сопротивление благодаря отрицательной обратной связи уменьшается и составляет

$$R_{вых,0,с} = R_{вых} K_{0,с} / K.$$

Для входного сигнала, поданного в схеме рис. 20.26 на неинвертирующий вход, $K_{0,с,н} = R_{0,с}/R_1 + 1$; если $R_{0,с} = 0$, то $K_{0,с,н} = 1$, т. е. схема становится повторителем напряжения. Входное сопротивление очень велико:

$$R_{вх,0,с} = R_{вх} \frac{K_{0,с}}{K_{0,с,н}}.$$

Суммирование напряжений

В схеме рис. 20.27 при $U \approx 0$ можно записать уравнения

$$I_a = U_a/R_a; \quad I_b = U_b/R_b; \quad I_c = U_c/R_c; \dots$$

$$I_{0,с} = I_a + I_b + I_c + \dots = -U_{вых}/R_{0,с}.$$

Тогда

$$U_{вых} = -R_{0,с} \left(\frac{U_a}{R_a} + \frac{U_b}{R_b} + \frac{U_c}{R_c} + \dots \right),$$

т. е. выходное напряжение равно взвешенной сумме входных со знаком минус и с весовыми коэффициентами $R_{0,с}/R_a$, $R_{0,с}/R_b$, $R_{0,с}/R_c, \dots$

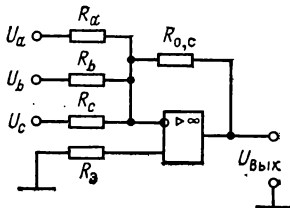


Рис. 20.27. Сумматор на ОУ

Если входные сопротивления равны ($R_a = R_b = R_c = \dots = R$), то

$$U_{вых} = -\frac{R_{0,с}}{R} (U_a + U_b + U_c + \dots).$$

Если же $R_{0,с} = R$, то выходное напряжение равно сумме входных со знаком минус:

$$U_{вых} = -(U_a + U_b + U_c + \dots).$$

Для повышения стабильности и устойчивости рекомендуется включать в цепь неинвертирующего входа резистор, сопротивление которого рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_{0,с}} + \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \dots$$

Интегрирование напряжения

Если в схеме рис. 20.26 заменить $R_{0,с}$ конденсатором C , то при $U \approx 0$ можно записать уравнения

$$i_{вх} = u_{вх}/R_1; \quad i_{0,с} = i_{вх};$$

$$u_{вых} = -u_c = -\frac{1}{C} \int i_{0,с} dt =$$

$$= -\frac{1}{R_1 C} \int u_{вх} dt.$$

Таким образом, выходное напряжение ОУ пропорционально интегралу входного. Это одно из наиболее распространенных применений ОУ в схемах аналоговых моделей, применяемых для решения дифференциальных уравнений.

Стабилизация напряжения

На основе ОУ выполняются компенсационные стабилизаторы напряжения. Маломощная нагрузка может включаться непосредственно на выход ОУ, при необходимости можно включать нагрузку в цепь транзистора T (рис. 20.28). Для дальнейшего повышения выходной мощности применяют составные транзисторы.

ОУ воспринимает разность опорного напряжения, снимаемого со стабилитрона D , и части напряжения нагрузки, подаваемой на инвертирующий вход:

$$U_{и} = U_{ст} \frac{R_1}{R_1 + R_{0,с}}.$$

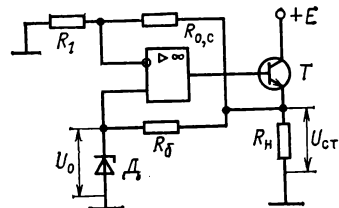


Рис. 20.28. Стабилизатор напряжения на ОУ

Таблица 20.4

Параметры	К142ЕН1				К142ЕН2			
	А	Б	В	Г	А	Б	В	Г
Нижний предел диапазона регулирования, В	3	3	3	3	12	12	12	12
Верхний предел диапазона регулировки, В	12	12	12	12	30	30	30	30
Коэффициент нестабильности, %	0,3	0,1	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5
Цена, руб.	2—95	4—40	2—95	4—40	5—85	8—05	5—85	9—05

Если из-за каких-либо возмущающих факторов напряжение на нагрузке уменьшается, то понижается потенциал инвертирующего входа, увеличивается выходное напряжение ОУ, транзистор T открывается, компенсируя возникшее уменьшение почти полностью благодаря большому усилению ОУ. Промышленно выпускаются регулируемые стабилизаторы напряжения (табл. 20.4), регулировка осуществляется изменением внешнего опорного напряжения.

Активные фильтры

При обработке информации, передаваемой электрическими сигналами, часто возникает необходимость в изменении коэффициента передачи составляющих сигнала с разными частотами. Эта задача решается с помощью частотно-зависимых цепей — фильтров. Традиционные фильтры на основе RLC -цепей не всегда эффективны, поэтому большое распространение получили активные фильтры на основе ОУ.

Фильтр нижних частот (рис. 20.29) содержит RC -цепи и ОУ с обратной связью, где $R_{o,c}=0$. Такой ОУ повторяет на выходе напряжение, поступающее на неинвертирующий (прямой) вход. Для медленно изменяющихся сигналов сопротивление конденсаторов можно считать бесконечно большими, поэтому $K \approx 1$. На высоких частотах сопротивление конденсатора становится малым, а фаза выходного напряжения — отстающей по отношению к входу. В результате модуль коэффициента передачи быстро уменьшается с ростом частоты. Частота сопряжения f_c , на которой начинается

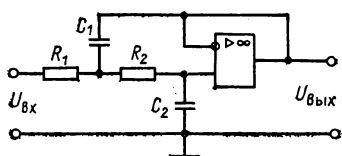


Рис. 20.29. Фильтр нижних частот на ОУ

спад коэффициента передачи, обычно задается, и по ней можно выбрать элементы схемы

$$C_1 = \frac{R_1 + R_2}{2\sqrt{2}\pi f_c R_1 R_2};$$

$$C_2 = \frac{1}{\sqrt{2}\pi f_c (R_1 + R_2)}.$$

Если конденсаторы и резисторы в схеме поменять местами, то фильтр станет фильтром высших частот.

Для построения режекторного фильтра, подавляющего коэффициент передачи в окрестности некоторой частоты f_0 , применяют двойные Т-образные фильтры (рис. 20.30). Частота

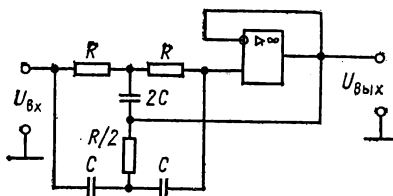


Рис. 20.30. Избирательный (режекторный) фильтр на ОУ с двойным Т-образным мостом

та режекции связана с параметрами фильтра соотношением

$$f_0 = 1/2 \pi RC.$$

Полосу частот, в которой осуществляется ослабление сигнала, можно изменять, передавая на мост не полное напряжение обратной связи, а его часть.

Ограничители напряжения

Для ограничения выходного напряжения ОУ на заданном уровне применяют цепи с диодами и источниками ЭДС или стабилизаторами. На рис. 20.31, а положительное напряжение выхода ограничено на уровне $+E$, для ограничения отрицательного напряжения следует использовать цепочки с противополож-

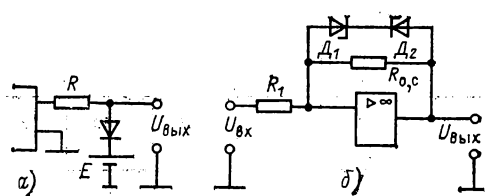


Рис. 20.31. Ограничитель напряжения:
а — с нелинейным элементом в выходной цепи; б — с нелинейным элементом в цепи обратной связи

ными полярностями диода и источника. Сопротивление R ограничивает выходной ток ОУ:

$$R \geq \frac{U_{\text{вых max}} - E}{I_{\text{н, доп}}}.$$

Можно избежать увеличения выходного сопротивления, используя схему рис. 20.31, б. Стабилитрон D_1 открывается, когда положительное напряжение выхода достигает суммы

$$U_{\text{вых}} = U_{D1(\text{обр})} + U_{D2(\text{пр})},$$

при этом усилитель дополнительно нагружается током

$$I = \frac{U_{\text{вых}} + U_{\text{вх}}}{R_1}.$$

Аналогично работает схема, ограничивая отрицательное напряжение $U_{\text{вых}}$ с помощью D_2 .

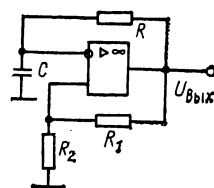
Компараторы

ОУ без обратной связи может использоваться в качестве компаратора — схемы сравнения двух напряжений, поданных на инвертирующий и прямой входы. Большой коэффициент усиления обеспечивает достижение выходным напряжением максимального или минимального уровней (либо уровней ограничения) при разности напряжений на входах порядка нескольких милливольт. Для защиты ОУ от перенапряжений на входах следует включать защитную цепочку по типу рис. 20.25. Если потенциал одного из входов равен нулю, схема выполняет функции чувствительного нуля-органа. При подаче на вход знакопеременного напряжения схема формирует на выходе прямоугольный сигнал. Скорость нарастания выходного напряжения ограничивается частотными свойствами ОУ и указывается в паспорте.

Генераторы прямоугольного напряжения

На основе ОУ можно строить генераторы релаксационных колебаний (мультивибраторы). С этой целью выполняют схемы с положительной обратной связью и с времязадающими пассивными цепочками (обычно RC -типа). Распространенная схема генератора прямоугольного напряжения (рис. 20.32) содержит цепь положительной обратной связи R_1, R_2 , через которую часть выходного напряжения передается на неинвертирующий вход.

Рис. 20.32. Мультивибратор на ОУ



Можно убедиться, что при выполнении условия

$$K \frac{R_2}{R_1 + R_2} > 1$$

схема не может устойчиво находиться в линейном режиме, любое ничтожно малое изменение $\Delta U_{\text{вых}}$ передается на прямой вход и приводит к еще большему отклонению выхода, так что окончательно выходное напряжение достигает одного из уровней насыщения: $U_{\text{вых min}}$ или $U_{\text{вых max}}$. Пусть конденсатор разряжен ($U_{\text{вх, н}} = 0$), а на выходе установилось напряжение $U_{\text{вых max}}$, тогда на прямом входе напряжение равно

$$U_{\text{вх, н}} = U_{\text{вых max}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Конденсатор заряжается с постоянной времени $\tau = RC$, причем напряжение на нем стремится к $U_{\text{вых max}}$. Когда разность потенциалов входов изменит знак на обратный, произойдет быстрое изменение полярности выходного напряжения и конденсатор начнет перезаряжаться. В дальнейшем процессы повторяются. Период работы генератора оценивается приближенной формулой

$$T = 2RC \ln \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right).$$

Частота генератора определяется времязадающей цепью RC и соотношением плеч делителя R_2/R_1 . Сумма сопротивлений на частоту практически не влияет и может лежать в пределах 10 кОм — 1 МОм. Отношение сопротивлений выбирается в пределах 0,05—0,5; ограничения обусловлены ухудшением формы напряжения генератора и снижением стабильности частоты.

На основе мультивибратора можно выполнить одновибратор (заторможенный мультивибратор) (рис. 20.33). С этой целью в схему вводится напряжение смещения E , которое делает устойчивым единственное состояние $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых min}}$. При подаче положительного импульса запуска U_3 через дифференцирующую цепь $C_d R_d$ напряжение выхода изменяется на $U_{\text{вых max}}$. Это новое состояние фикси-

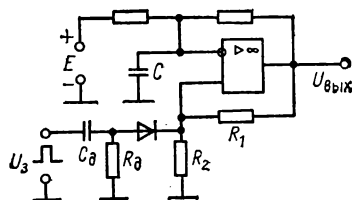


Рис. 20.33. Одновибратор на ОУ

руется путем подачи с выхода смещения на прямой вход через R_1 , R_2 . Одновременно начинается перезаряд конденсатора C . В момент, когда напряжение на конденсаторе сравняется со смещением на прямом входе, схема возвратится в устойчивое состояние.

Преобразователи напряжения в частоту и длительность импульса

Функциональная схема преобразователя напряжения в частоту или длительность импульсов содержит интегратор I , компаратор K и цепь импульсной обратной связи OC (рис. 20.34). Преобразователь напряжения в частоту работает следующим образом: интегратор фиксирует напряжение, скорость изменения

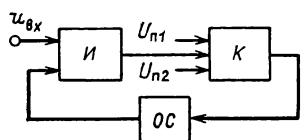


Рис. 20.34. Преобразователь напряжения в частоту

которого пропорциональна $u_{вх}$. В момент, когда достигается пороговый уровень $U_{п1}$, компаратор через цепь OC выдает одно из следующих воздействий на интегратор:

быстрый разряд накопительного элемента (конденсатора), после чего процесс повторяется;

изменение знака интегрирования, в результате чего напряжение на выходе интегратора начинает изменяться в противоположном направлении, пока не будет достигнут уровень $U_{п2}$. Затем следует очередное изменение знака интегрирования и процесс повторяется.

Второй способ более сложен в реализации, однако обеспечивает лучшую линейность преобразования напряжения в частоту.

20.7. ЛОГИЧЕСКИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Типы логических схем

Цифровые (логические) микросхемы выпускаются сериями, которые включают обычно несколько типов, обеспечивающих функциональную полноту и удобство при разработке устройств. Одним из важнейших принципов, по которым различают серии, является тип логики, определяемый технологией. Полные и детальные сведения о микросхемах можно получить в справочнике [3], общая характеристика и примеры наиболее распространенных серий для каждого типа логики приведены ниже.

1. *Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ)*. Интегральные микросхемы характеризуются высоким быстродействием (задержка на логический элемент — 5 нс), сравнительно большой площадью, занимаемой отдельным элементом ($2,5 \cdot 10^{-2}$ мм²), большой мощностью (2 мВт на элемент), малым числом различных источников и сравнительно высокими требованиями к их стабильности. Одна из наиболее распространенных серий ТТЛ —

K155. Она содержит около 80 типов различных схем малой, средней и большой степени интеграции от простых схем И—НЕ до узлов вычислительных устройств: регистров, счетчиков, мультиплексоров, запоминающих, арифметических, логических устройств и пр.

Стоимость одной микросхемы — 0,17 руб. для K155ЛА3, 1,5 руб. для K155ИЕ1, 3,1 руб. для K155ИЕ8, 5,0 руб. для K155РЕ3.

2. *Транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки (ТТЛШ)*. Микросхемы во многом сходны по основным показателям с ТТЛ, характеризуются более высоким быстродействием благодаря отсутствию насыщения у транзисторов. По этой технологии выполняются серии K531 (21 тип интегральных схем), K555 (30 типов), K589 — микропроцессорный набор, характеризующийся повышенным быстродействием. Стоимость основных микропроцессорных БИС: K589ИК01 — 8,5 руб., K589ИПА16, K589АП26 — 1,9 руб., K589ИК02 — 6,4 руб., K589ИК03 — 3,95 руб., K589ИК14 — 4,95 руб., K589ИР12 — 3,5 руб.

3. *Эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ)*. Интегральные микросхемы характеризуются высоким быстродействием, но сравнительно малой помехоустойчивостью. Основные характеристики ЭСЛ схем: площадь логического элемента — $2,5 \cdot 10^{-2}$ мм²; мощность на элемент — 10 мВт, задержка на элемент — 1 нс. Примером ЭСЛ схем является серия K500 (45 типов схем).

4. *Высокопороговая диодно-транзисторная логика (ДТЛ)*. Схемы этого типа характеризуются высокой помехозащищенностью (высоким пороговым уровнем логических сигналов), низким быстродействием, невысокой степенью интеграции. Примером логики этого типа является серия K511 (семь типов схем). Рекомендуемая область применения — промышленная автоматика в условиях больших помех.

5. *Интегральная инжекционная логика (И²Л)* — один из перспективных видов интегральных микросхем; схемы этого типа характеризуются малой мощностью на элемент, высоким быстродействием. По этой технологии выполняются микропроцессоры серий КР583 и КР584.

6. *p-МДП*. Технология предполагает использование *p*-канальных МДП транзисторов. Характеризуется низкой стоимостью, получила распространение в бытовой аппаратуре (бытовая аппаратура, калькуляторы и пр.). Площадь логического элемента — $5 \cdot 10^{-3}$ мм², задержка — 100 нс, мощность — 2—3 мВт. По этой технологии выпускаются серии K144, K145, K186 и др.

7. *n-МДП технология* — одна из самых распространенных для схем с малым и средним быстродействием, по этой технологии выполняются микропроцессоры таких серий, как КР580, K180, КР1809, K1810. Площадь логического элемента — $4 \cdot 10^{-3}$ мм², задержка — 40—100 нс, мощность — 0,2—0,5 мВт.

8. *КМДП-технология* — комплементарные транзисторы, находящиеся во взаимно противоположных состояниях, обеспечивают чрезвычайно малое потребление энергии, повышенную помехозащищенность и нечувствительность к уровню питающего напряжения. Площадь вентиля — $(6 \div 18) \cdot 10^{-3}$ мм², задержка — 15—

50 нс, мощность — менее 1 мВт. По этой технологии выпускаются серии К561 (20 типов), К176, К188, микропроцессоры КР588.

Основные понятия о логических функциях

Логические интегральные микросхемы (ИМС) служат для операций с дискретными сигналами, принимающими два значения, например высокий и низкий (нулевой) потенциалы. Одному из уровней сигнала приписывается символ 1, другому — 0, причем выбор символа для обозначения высокого потенциала произволен. В распространенной системе ИМС серии К155 принято обозначать 0 низкий потенциал (от 0 до +0,4 В), а 1 — высокий (от +2,4 до +5 В). Такая система получила название «положительной логики».

Каждая серия логических элементов содержит несколько типов логических схем, реализующих различные логические функции.

Логическая функция И (логическое умножение, конъюнкция) описывается таблицей соответствия (табл. 20.5), которая может быть

Таблица 20.5

x	y	f
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица 20.6

x	y	f
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

прочитана так: функция принимает значение 1 только в том случае, если и первый, и второй аргументы принимают единичное значение. Аналитическая запись функции И:

$$f = xy \text{ или } f = x \& y.$$

Логическая функция ИЛИ (логическое сложение, дизъюнкция) описывается таблицей соответствия (табл. 20.6), которая может быть прочитана так: функция принимает значение 1 в том случае, если или первый, или второй, или оба сразу аргумента принимают единичные значения. Аналитическая запись функции ИЛИ:

$$f = x + y \text{ или } f = x \vee y.$$

Обе функции можно распространить на любое число переменных: $f = x_1 x_2 x_3 \dots x_n$ равна 1, если $x_1 = x_2 = x_3 = \dots = x_n = 1$; $f = x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee \dots \vee x_n$ равна 0, если $x_1 = x_2 = x_3 = \dots = x_n = 0$.

Функция НЕ — отрицание логической величины. Логическое отрицание (инверсия) записывается в виде $\bar{x}$ и читается «НЕ x ». Если $x = 0$, то $\bar{x} = 1$, если $x = 1$, то $\bar{x} = 0$.

Для интерпретации любых логических функций широко используются карты Карно (рис. 20.35). Карта для двух аргументов содержит 4 клетки, для трех — 8, для m — 2^m клеток. Такое количество клеток достаточно для отображения всех возможных наборов аргументов. Так, в верхней строке карты на рис. 20.35 имеем пересечение аргумента x с аргументами $y, \bar{y}$, в нижней — $\bar{x}$ с $y, \bar{y}$.

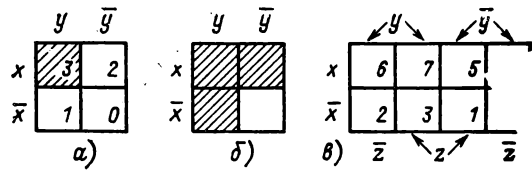


Рис. 20.35. Карты Карно:

а — функция И двух аргументов; б — функции ИЛИ двух аргументов; в — размещение наборов трех аргументов

Все возможные наборы аргументов и их инверсий (обозначаемые в общем виде $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$) можно свести в табл. 20.7, где представлены двоичные и десятичные числа, соответствующие

Таблица 20.7

Наборы трех аргументов				Десятичные эквиваленты
Набор	Двоичный эквивалент			
$\bar{x} \bar{y} \bar{z}$	0	0	0	0
$\bar{x} \bar{y} z$	0	0	1	1
$\bar{x} y z$	0	1	0	2
$\bar{x} y \bar{z}$	0	1	1	3
$x \bar{y} \bar{z}$	1	0	0	4
$x \bar{y} z$	1	0	1	5
$x y \bar{z}$	1	1	0	6
$x y z$	1	1	1	7

шие каждому набору. Положим, что $x=1, \bar{x}=0, y=1, \bar{y}=0, z=1, \bar{z}=0$, тогда набор xyz представляется в виде двоичного числа 100, т. е. десятичного 4. Часто вместо записи набора пользуются его десятичным эквивалентом. Каждый набор размещается в одной клетке карты Карно, причем смежные клетки различаются только в одном разряде двоичного числа (0 и 4, 1 и 3, 7 и 5). Такие числа называют соседними. Заметим, что соседними будут также числа в клетках, которые окажутся смежными после свертывания карты Карно в цилиндр (0 и 2, 4 и 6). Подобным образом можно построить карты Карно для четырех, пяти и более аргументов, хотя практически этот способ изображения наборов аргументов трудно использовать при числе аргументов больше семи-восьми.

Соотношения алгебры логики

Для операции над логическими функциями следует знать основные соотношения, истинность которых можно проверить на всех наборах прямой подстановкой значений аргументов 0 или 1:

$$0 \vee x = x; \quad 0 \cdot x = 0; \quad 1 \vee x = 1;$$

$$1 \cdot x = x; \quad x \vee x = x; \quad x x = x; \quad \bar{\bar{x}} = x;$$

$$x\sqrt{x} = 1; \quad x \cdot \bar{x} = 0; \quad x \vee y = y \vee x;$$

$$xy = yx; \quad x \vee (y \vee z) = (x \vee y) \vee z;$$

$$x(yz) = (xy)z; \quad x(y \vee z) = xy \vee xz;$$

$$\overline{x \vee y} = \bar{x} \bar{y}; \quad \overline{x \cdot y} = \bar{x} \vee \bar{y}.$$

На основании приведенных тождеств можно производить минимизацию логических выражений.

Примеры:

$$1. a \vee \bar{a}b = a (b \vee \bar{b}) \vee \bar{a}b = ab \vee a\bar{b} \vee \bar{a}b =$$

$$= ab \vee a\bar{b} \vee ab \vee \bar{a}b = a(b \vee \bar{b}) \vee b(a \vee \bar{a}) = a \vee b.$$

$$2. (x \vee y)(y \vee z) = xy \vee xz \vee y \vee yz = y(x \vee 1 \vee z) \vee xz = y \vee xz.$$

Наборы аргументов, сведенные в таблицу или представленные в виде карты Карно, дают возможность определять различные логические функции. Так, на рис. 20.35, а показана функция И, принимающая значение единицы на наборе 3 (заштрихован) и 0 на всех остальных наборах, на рис. 20.35, б показана функция ИЛИ.

На четырех наборах двух аргументов x и y определяют $2^4=16$ различных функций (табл. 20.8). Каждая функция f записана в одной из строк таблицы, пронумерованных числами от 0 до 15. В верхних двух строках записаны все возможные наборы переменных x и y : 00, 01, 10, 11. Каждому набору может соответствовать одно из двух значений функции $f=0$ или $f=1$. В таблице записаны все возможные комбинации значений функции на всех четырех наборах в виде последовательности четырехразрядных двоичных чисел от 0000 до 1111. В правом столбце даны аналитические значения функции f .

Из этих функций две тривиальны — это константы $f_0=0$ и $f_{15}=1$, четыре функции зависят только от одного аргумента ($f_3=x$, $f_5=y$, $f_{10}=\bar{y}$, $f_{12}=\bar{x}$), а из оставшихся десяти наиболее употребительны

$$f_1 = xy \text{ — конъюнкция (И);}$$

$$f_{14} = \bar{xy} \text{ — отрицание конъюнкции (НЕ—И);}$$

$$f_7 = x \vee y \text{ — дизъюнкция (ИЛИ);}$$

$$f_8 = \overline{x \vee y} \text{ — отрицание дизъюнкции (НЕ—ИЛИ);}$$

$$f_6 = \bar{x}y \vee x\bar{y} \text{ — неравнозначность (сумма по модулю 2);}$$

$$f_9 = xy \vee \bar{x}\bar{y} \text{ — равнозначность;}$$

$$f_2 = xy \text{ — запрет } x \text{ (функция повторяет значение } x, \text{ если отсутствует сигнал запрета } y);$$

$$f_4 = \bar{x}y \text{ — запрет } y.$$

С увеличением числа аргументов m множество различных функций быстро растет [2^{2^m}]. Однако их удается выразить через комбинацию тех же зависимостей И, ИЛИ, НЕ, как это сделано в табл. 20.8.

Минимизация логических выражений

Логические функции можно задавать с помощью таблиц соответствия или карт Карно. Они служат удобным средством для формального описания логических задач, выявления любой неоднозначности или неполноты в по-

Таблица 20.8. Функции двух аргументов

№	$x=0$ $y=0$	0 1 1 1 0 1	f
0	0	0 0 0	0
1	0	0 0 1	$xy = x \vee y$
2	0	0 1 0	$\bar{x}y = \bar{x} \vee y$
3	0	0 1 1	x
4	0	1 0 0	$\bar{x}y = x \vee \bar{y}$
5	0	1 0 1	y
6	0	1 1 0	$\bar{x}y \vee x\bar{y}$
7	0	1 1 1	$x \vee y$
8	1	0 0 0	$\overline{x \vee y} = \bar{x} \bar{y}$
9	1	0 0 1	$xy \vee \bar{x} \bar{y}$
10	1	0 1 0	$\bar{y}$
11	1	0 1 1	$x \vee \bar{y}$
12	1	1 0 0	$\bar{x}$
13	1	1 0 1	$\bar{x} \vee y$
14	1	1 1 0	$\bar{x}y = x \vee \bar{y}$
15	1	1 1 1	1

становке. Заданную таким образом логическую функцию можно минимизировать, т.е. свести к минимуму число букв в аналитическом выражении формулы, а затем построить принципиальную схему с использованием типовых логических элементов.

Таким образом, операции над логическими функциями являются составной частью синтеза логических схем.

Примеры описания и минимизации логических схем

1. Построить схему, выполняющую функцию мажорирования «2 из 3». Схема имеет три входа и один выход; выход повторяет логический сигнал, который присутствует на большинстве входов (2 или 3). Табличная запись логической зависимости (табл. 20.9) делит все наборы аргументов на две группы: наборы 0, 1,

Таблица 20.9

№	a	b	c	f
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	1
4	1	0	0	0
5	1	0	1	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	1

2, 4, на которых функция принимает нулевое значение, и наборы 3, 5, 6, 7, где функция равна 1. Эта функция изображена на карте Карно (рис. 20.36).

Аналитически функцию можно описать в дизъюнктивной или конъюнктивной канонических формах (ДКФ или ККФ). В ДКФ функцию записывают как логическую сумму конъюнкций

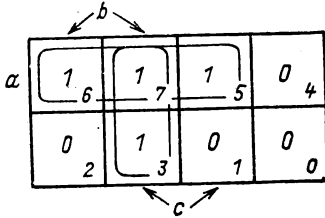


Рис. 20.36. Минимизация мажоритарной функции «2 из 3»

нкций всех аргументов тех наборов, на которых $f_1=1$. Если аргумент принимает значение 1 в данном наборе, его записывают без знака инверсии, в противном случае — с инверсией:

$$f_1 = \bar{a}\bar{b}c \vee a\bar{b}c \vee ab\bar{c} \vee abc.$$

Полученное выражение можно минимизировать:

$$f_1 = \bar{a}\bar{b}c \vee abc \vee \bar{a}b\bar{c} \vee abc \vee ab\bar{c} \vee abc = bc(\bar{a} \vee a) \vee ac(\bar{b} \vee b) \vee ab(\bar{c} \vee c) = bc \vee ac \vee ab.$$

В ККФ функцию записывают как логическое произведение дизъюнкций всех аргументов тех наборов, на которых $f_1=0$. Если аргумент принимает значение 0 в данном наборе, его записывают без знака инверсии, в противном случае — с инверсией:

$$f_1 = (a \vee b \vee c)(a \vee b \vee \bar{c})(a \vee \bar{b} \vee c)(\bar{a} \vee b \vee c).$$

Полученное выражение также можно минимизировать:

$$f_1 = (a \vee b \vee c)(a \vee b \vee \bar{c})(a \vee b \vee c)(a \vee \bar{b} \vee c) \times (a \vee b \vee c)(\bar{a} \vee b \vee c) = (a \vee b)(a \vee c) \times (b \vee c) = ab \vee bc \vee ac.$$

Минимизацию удобно выполнять с помощью карт Карно, где эта операция становится предельно наглядной.

Логическая функция, которая принимает значение 0 на одной группе наборов аргументов и 1 на другой группе, записывается в соответствующих клетках карты Карно. Соседние клетки карты, на которых функция принимает одно значение, например 1, можно объединять («склеивать») попарно (при этом выпадает один аргумент, принимающий разные значения в клетках) или по 4, 8, 16. При этом склеиваемые клетки должны образовывать полную строку, полный столбец, квадрат или прямоугольник. Для функции f_1 на рис. 20.36 удастся склеить пару 6 и 7, следовательно, значение функции на наборах 6 и 7 можно записать как ab (выпадает c), при склеивании па-

ры 7 и 5 значение функции запишется как ac (выпадает b), при склеивании 3 и 7 значение функции запишется как bc (выпадает a); логическая сумма (дизъюнкция) всех наборов, на которых функция принимает значение 1, дает, как и ранее.

$$f_1 = ab \vee ac \vee bc.$$

2. Пусть логическая зависимость формулируется следующим образом: генератор можно включать в систему методом точной синхронизации, т. е. при наличии возбуждения, равенстве частот и совпадении фаз, а также методом самосинхронизации, т. е. при отсутствии возбуждения и при равенстве частот. Условие, при котором допускается включение генератора в сеть, можно описать логической зависимостью.

Пусть сигнал наличия возбуждения $a=1$, сигнал равенства частот $b=1$, сигнал совпадения фаз $c=1$, сигнал совпадения напряжений $d=1$. Все возможные наборы аргументов сведем в табл. 20.10. Их можно разделить на три группы:

1) наборы аргументов, на которых функция f_2 принимает значение 1, т. е. включение разрешается. Это наборы 4 и 15, соответствующие самосинхронизации и точной синхронизации;

2) наборы аргументов, на которых $f_2=0$, т. е. включение не разрешается. Это наборы 0, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14;

3) наборы аргументов, которые внутренне противоречивы, а потому никогда не могут быть реализованы: 1, 2, 3, 5, 6, 7. Можно считать, что функция на этих наборах не определена.

Запишем функцию в ДКФ:

$$f_2 = \bar{a}\bar{b}\bar{c}d \vee abcd.$$

Можно убедиться, что $f_2=1$, если реализуются наборы 4 или 15 ($a=0, b=1, c=d=0$ или $a=b=c=d=1$).

Таблица 20.10

№	a	b	c	d	f_2
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	X
2	0	0	1	0	X
3	0	0	1	1	X
4	0	1	0	0	1
5	0	1	0	1	X
6	0	1	1	0	X
7	0	1	1	1	X
8	1	0	0	0	0
9	1	0	0	1	0
10	1	0	1	0	0
11	1	0	1	1	0
12	1	1	0	0	0
13	1	1	0	1	0
14	1	1	1	0	0
15	1	1	1	1	1

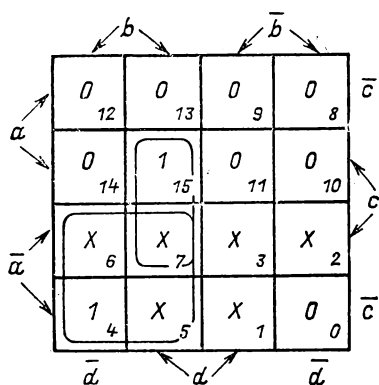


Рис. 20.37. Минимизация неполностью определенной функции четырех аргументов

Наличие группы наборов, на которых функция не определена, дает дополнительную возможность минимизации. Разместим значения функции в клетках карты Карно четырех аргументов (рис. 20.37).

Доопределим наборы 5, 6, 7 до единицы, а 1, 2 и 3 — до нуля, т. е. припишем соответствующим наборам значения 1 или 0 для получения наиболее крупных групп склеиваемых клеток. Тогда оказывается возможным склеить четыре клетки 4, 5, 6, 7 и пару клеток 7 и 15. Полученный результат имеет четкую физическую трактовку, вполне отвечающую постановке задачи:

$$f_2 = \bar{a}b \vee bcd.$$

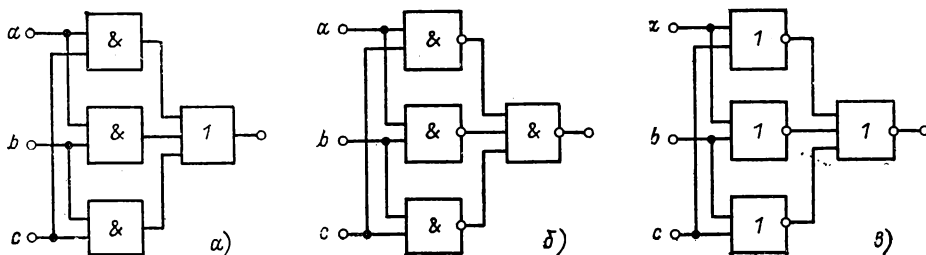


Рис. 20.38. Схемы мажоритарной логики:

а — на элементах И, ИЛИ; б — на элементах И—НЕ; в — на элементах ИЛИ—НЕ

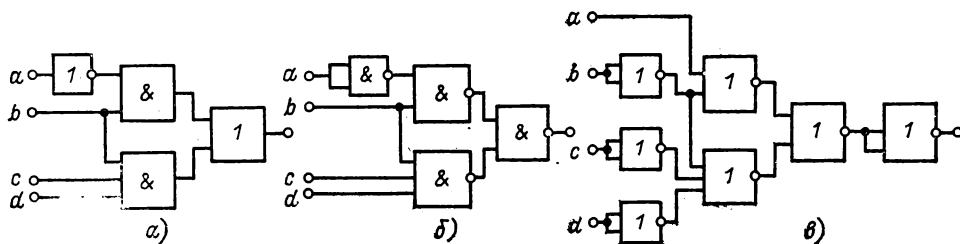


Рис. 20.39. Схемы пуска генератора:

а — на элементах И—ИЛИ; б — на элементах И—НЕ; в — на элементах ИЛИ—НЕ

Аппаратурная реализация логических зависимостей

Логические зависимости, полученные в результате описания и минимизации, можно реализовать, используя типовые элементы. В каждой серии логических интегральных микросхем содержится функционально полный набор элементов. Так, если в серии содержатся элементы И, ИЛИ, НЕ, то выражения, полученные в примерах 1 и 2, реализуются схемами рис. 20.38, а и 20.39, а. Функционально полный набор представляет единственный тип элемента И—НЕ, а также единственный тип ИЛИ—НЕ.

Двухвходовый элемент И—НЕ реализует функцию $f = \bar{x}y = x \vee \bar{y}$.

Если на оба входа подан один и тот же сигнал либо сигнал подан на один вход, а на другой — константа 1, то элемент реализует функцию НЕ: $f = \bar{x}x = \bar{x} \cdot 1 = \bar{x}$.

Элемент ИЛИ—НЕ реализует функцию $f = x \vee \bar{y} = \bar{x}y$.

Если на оба входа подан один и тот же сигнал либо сигнал подан на один вход, а на другой — константа 0, то элемент реализует функцию И: $f = x \vee \bar{x} = x \vee 0 = x$.

Реализация функций И и ИЛИ на элементах И—НЕ, ИЛИ—НЕ показана на рис. 20.40. Возможность реализовать функции И, ИЛИ, НЕ делает набор полным. Это создает определенные удобства при проектировании, поскольку номенклатура элементов сводится к минимуму. Однако для реализации функциональных зависимостей на базе И—НЕ либо ИЛИ—НЕ необходимо записать выражения в форме, которая соответствует выбранной базе. Для базы И—НЕ выражения примеров 1 и 2 приведем к виду рис. 20.38, б, 20.39, б.

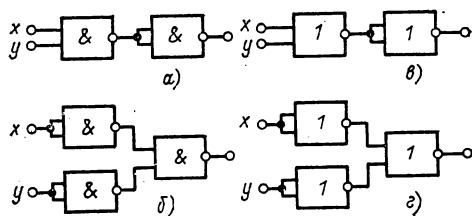


Рис. 20.40. Реализации основных логических функций на элементах И—НЕ, ИЛИ—НЕ:

а, г — И; б, в — ИЛИ

Для базы ИЛИ—НЕ соответственно (рис. 20.38, в, 20.39, в)

$$\begin{aligned}
 f_1 &= (a \vee b)(b \vee c)(a \vee c) = \\
 &= \overline{a \vee b \vee b \vee c \vee a \vee c}; \\
 f_2 &= \overline{ab} \vee bcd = \overline{a \vee \overline{b} \vee \overline{b} \vee c \vee \overline{d}}; \\
 f_1 &= ab \vee bc \vee ac = \overline{ab \vee bc \vee ac} = \\
 &= \overline{ab \vee bc \vee ac}; \\
 f_2 &= \overline{ab} \vee bcd = \overline{ab \vee bcd}.
 \end{aligned}$$

Минимизация аппаратных затрат практически не формализуется, т. е. ее не удастся свести к последовательности применяемых правил, однако для сравнения различных решений существуют методы, сводящиеся к оценке общего числа входов микросхем.

Построение логической схемы сводится к последовательности действий:

- 1) составить таблицу соответствия;
- 2) описать логическую функцию на карте Карно или аналитически;
- 3) минимизировать логическое выражение, доопределив неполностью определенную функцию;
- 4) записать логическое выражение в форме, соответствующей выбранному элементному базису;
- 5) составить принципиальную схему.

Дешифраторы

Распространенный класс логических схем — дешифраторы. Дешифратор имеет m независимых входов и 2^m выходов. На входы подаются всевозможные наборы аргументов, каждому набору соответствуют сигналы 0 (или 1) на одном выходе и 1 (или 0) на остальных. Пример дешифратора на три независимых входа x, y, z приведен на рис. 20.41 (инверсные входные сигналы $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ легко получить с помощью схем НЕ). Набору 000 соответствует сигнал 0 на выходе 0, на остальных выходах имеем логическую 1; набору 101 соответствует сигнал на выходе 5 и т. д.

Дешифраторы выпускаются в качестве интегральных микросхем средней степени интеграции (СИС), иногда они снабжаются дополнительным разрешающим входом. Так,

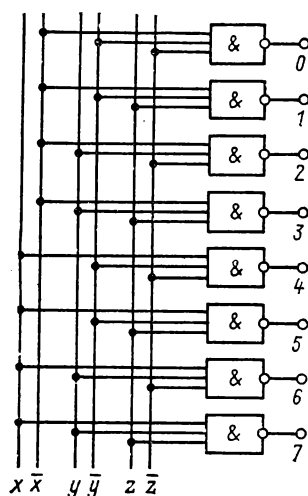


Рис. 20.41. Дешифратор на элементах И—НЕ

дешифратор серии К501ИД1П имеет 4 сигнальных входа (A, B, C, D), вход разрешения (стробирования) P и 16 выходов y :

$$y_i = \bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}P.$$

Триггеры и триггерные устройства

Рассмотренные выше логические схемы называют комбинационными, поскольку выходной сигнал однозначно определяется набором (комбинацией) аргументов на входах независимо от того, какие значения принимали аргументы в предшествовавшие моменты времени. Между тем на практике часто возникает необходимость поставить логическую величину на выходе схемы в некоторую зависимость от предыстории.

Покажем два примера задач такого рода.

1. Логический сигнал на выходе схемы должен принять значение 1, если входной сигнал y поступил не позже чем через 1 с после поступления сигнала x . Здесь накладываются ограничения на протяженность временных интервалов. Построение таких схем требует применения схем задержек (таймеров), которые в зависимости от значения сигнала и требуемой точности выполняются либо на операционных усилителях, либо на логических элементах.

2. Логический сигнал на выходе схемы должен принять значение 1, если сигналы x и y поступают на вход схемы в заданной последовательности. Здесь накладываются ограничения на последовательность изменения состояний, для чего их приходится запоминать. Число предшествующих состояний, которое необходимо запомнить для нормального функционирования схемы, определяет требуемую глубину памяти. Дальнейшее рассмотрение будет посвящено только схемам с памятью.

Простейшим элементом памяти является RS-триггер (рис. 20.42) от английских слов

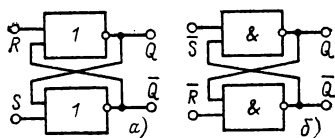


Рис. 20.42. RS-триггер:

а — на элементах ИЛИ—НЕ; б — на элементах И—НЕ

set — установка, reset — сброс). Он представляет собой схему с обратной связью, выполненную на элементах И—НЕ либо ИЛИ—НЕ. При системе обозначений рис. 20.42 функционирование обеих схем описывается одинаково, Q_{t+1} — состояние выхода после поступления указанного набора входных сигналов.

Из табл. 20.11 следует, что при $R=S=0$ схема сохраняет свое предшествующее состояние, комбинации сигналов 01 и 10 устанавливают выход в одно из состояний: 1 или 0, и это состояние хранится (запоминается) после перехода к входной комбинации 00. Комбинация 11 считается запрещенной, поскольку действие обратных связей при этом нарушается и последующее действие обратных связей не определено. Заметим, что для схемы рис. 20.42, б все входные сигналы в таблице следует инвертировать.

Триггеры описываются также аналитическими зависимостями и функциями возбуждения (табл. 20.12).

Таблица 20.11

R	S	Q_{t+1}
0	0	Q_t
0	1	1
1	0	0
1	1	—

Таблица 20.12

Q_t	Q_{t+1}	R	S
0	0	b	0
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	b

$$Q_{t+1} = \bar{R}(SVQ_t).$$

Функция возбуждения показывает, какая совокупность сигналов на входах обеспечивает переход из состояния Q_t в состояние Q_{t+1} . Буквой b обозначено безразличное состояние входа.

Различают асинхронные и синхронные (тактируемые) триггеры. Первые изменяют свое состояние только под действием входных сигналов. Тактируемые триггеры имеют дополнительный вход C (от английского clock — часы), сигналы которого разрешают изменение состояния. Схемная реализация и диаграммы работы тактируемого RS-триггера приведены на рис. 20.43.

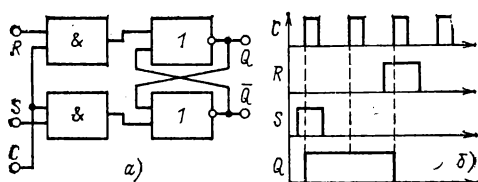


Рис. 20.43. Синхронный RS-триггер:

а — схема; б — диаграммы работы

В интегральном исполнении выпускаются тактируемые триггеры D- и JK-типов. Их функционирование описывается таблицами соответствия, логическими формулами и функциями возбуждения (табл. 20.13—20.16).

Таблица 20.13

D_t	Q_{t+1}
0	0
1	1

$$Q_{t+1} = CD_t.$$

Таблица 20.14

J	K	Q_{t+1}
0	0	Q_t
0	1	0
1	0	1
1	1	$\bar{Q}_t$

$$Q_{t+1} = J\bar{Q}_t \vee \bar{K}Q_t.$$

Таблица 20.15

Q_t	Q_{t+1}	D_t
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

Таблица 20.16

Q_t	Q_{t+1}	J	K
0	0	0	b
0	1	1	b
1	0	b	1
1	1	b	0

Счетчики

Счетчиками называют схемы, которые могут находиться в N различных состояниях и переходят из одного состояния в другое в определенной последовательности под действием входного сигнала. Простейший счетчик на сложение (рис. 20.44) может быть построен на триггерах D- или JK-типа. Входной сигнал T поступает на вход C первого триггера. Если соединить инверсный выход с входом D, то в соответствии с уравнением

$$Q_{t+1} = CD_t = C\bar{Q}_t$$

с приходом каждого импульса на вход C состояние выхода будет изменяться на противоположное. Момент изменения состояния совпадает с положительным перепадом сигнала C. Соединив инверсный выход первого триггера с входом второго, получим, что Q_2 будет из-

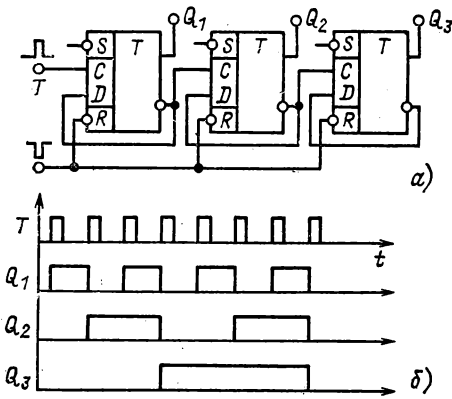


Рис. 20.44. Двоичный счетчик на сложение:
а — схемы; б — диаграмма состояний

меняться при положительных перепадах $\bar{Q}_1$, которые совпадают во времени с отрицательными перепадами Q_1 . Для установки всех триггеров в исходное (нулевое) состояние используют общий сигнал, подаваемый на все установочные входы R . После прихода очередного импульса на выходах Q_3, Q_2, Q_1 будем получать последовательность двоичных чисел 001, 010, 011..., соответствующих числу поступивших импульсов. Число состояний двоичного счетчика

$$N = 2^m,$$

где m — число триггеров.

Аналогично выполняется счетчик на JK -триггерах. Если вход следующего триггера будет соединен не с инверсным, а с прямым выходом предыдущего, то получим счетчик на вычитание, число в котором будет уменьшаться на единицу с приходом каждого счетного импульса. Можно выполнить управляемую систему связей между триггерами, которая позволяет изменять режим работы (сложение — вычитание). Такие счетчики называют реверсивными. Число состояний счетчика можно уменьшать, запрещая некоторые (избыточные) состояния. Так, для построения счетчика с тремя состояниями ($N=3$) необходимо запретить одно избыточное состояние в схеме на двух триггерах (рис. 20.45, а). Если в исходном состоянии $Q_1=Q_2=0$, то первый импульс изменит состояние первого триггера, поскольку $J_1=Q_2=0$. Второй импульс, не изменяя состояния первого триггера, у которого по-прежнему $J_1=0$, установит $Q_2=1$, поскольку $J_2=K_2=1$. Наконец, третий импульс возвратит оба триггера в исходное состояние (рис. 20.45, б). Опрокидывание триггеров про-

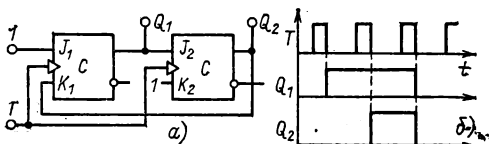


Рис. 20.45. Счетчик на три

исходит в момент отрицательного перепада сигнала C . Для получения $N=10$ (десятичный счетчик) запрещают шесть избыточных состояний в схеме на четырех триггерах. Четырехразрядные счетчики и счетчики на 10 выпускаются в настоящее время в интегральном исполнении как одна микросхема с повышенной степенью интеграции (K155IE1, K155IE2, K155IE5, K155IE7, K155IE8).

Регистры

Регистром называют устройство для приема, хранения (запоминания), поразрядного логического сложения и сдвига информации. Входную информацию можно вводить в регистр одновременно во все разряды (параллельные регистры) или последовательно. Функция приема и хранения параллельной информации поясняется рис. 20.46. Входной набор (входное слово $\tilde{x}y\tilde{z}$) поступает на входы

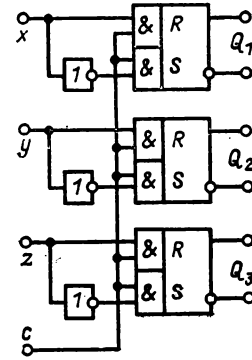


Рис. 20.46. Регистр памяти

верхних схем И, а инвертированное слово — на входы нижних схем И. Таким образом, на схемах И, связанных с любым из триггеров, всегда будут взаимно инверсные сигналы. В момент поступления сигнала C осуществляется установка триггеров в состояния, обусловленные сигналами на R - и S -входах.

Операция сдвига служит основой умножения двоичных чисел: например, сдвинув число 101 влево на один разряд, увеличим его вдвое (1010). Сдвиговый регистр с последовательным вводом информации показан на рис. 20.47. В момент поступления тактирующего импульса C в первый триггер запишется сигнал $\tilde{x}$, который действовал на входе D_1 . Второй импульс переписет этот сигнал во второй триггер и т. д. Таким образом, всегда

$$Q_{i+1,t+1} = Q_{i,t},$$

где $Q_{i,t}$ — выход i -го триггера на такте t .

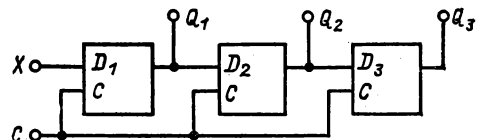


Рис. 20.47. Регистр сдвига

Путем введения дополнительных управляемых связей между триггерами получают возможность сдвига записанного слова как вправо, так и влево. Некоторые виды регистров также выпускаются в виде интегральных схем с повышенной степенью интеграции (К155ИР1, К155ИР13).

Распределители

Распределитель представляет собой разновидность схемы с памятью, которая распределяет входные сигналы по нескольким каналам на выходе. Очевидно, что число независимых каналов не может быть больше числа состояний схемы. Простейший распределитель на три канала имеет три состояния, в каждом из которых на одном из выходов имеется логическая единица, а на остальных выходах — нуль. Последовательность состояний распределителя можно записать кодовыми словами: 100, 010, 001... Можно выполнить распределитель с иной продолжительностью действия логического сигнала на выходах. Например, в схеме с состояниями выхода 011, 101, 110 логическая единица присутствует на каждом из выходов в течение двух тактов.

В схемном отношении распределитель не является специфическим классом схем; функцию распределения сигналов по нескольким каналам на выходе можно реализовать на основе известных схем счетчиков и регистров.

Число состояний счетчика или регистра определяется необходимым числом независимых выходных каналов. Выходы счетчика (регистра) связаны с выходными каналами распределителя через дешифратор. В счетчике с $N=3$ (рис. 20.45) состояния чередуются в последовательности 00, 10, 11...; состояние 01 запрещено. Дешифратор с выходами a, b, c должен реализовать функции

$$a = \bar{Q}_1; \quad b = Q_1\bar{Q}_2; \quad c = Q_2.$$

Синтез схем с памятью

Каждая схема с памятью представляет собой автомат, который характеризуется наборами входных и выходных сигналов и наборами внутренних состояний.

Наиболее простой из автоматов — двоичный счетчик — имеет единственный вход. Регистр на рис. 20.46 имеет три входа и допускает $2^3=8$ комбинаций входных сигналов. Для того чтобы синтезировать схему, необходимо выполнить определенную последовательность как формализуемых, так и неформализуемых операций. Рассмотрим их на примере синтеза схемы, которая при подаче на ее вход импульсов устанавливалась бы последовательно в шести циклически повторяющихся состояниях: 000—001—011—111—110—100—000. Выберем в качестве элементарных автоматов для синтеза этой схемы D-триггеры, функция возбуждения которых приведена выше. Переход схемы в каждое последующее состояние z_{t+1} обусловлен входным сигналом x и предыдущим состоянием z_t :

$$z_{t+1} = f(x, z_t).$$

Таблица 20.17

№	t			$t+1$			D_1	D_2	D_3
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_1	Q_2	Q_3			
1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1
3	0	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	0	1	1	0
5	1	1	0	1	0	0	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Поскольку число состояний известно, можно определить минимально необходимое количество триггеров как ближайшее большее целое от логарифма N по основанию 2:

$$m = \lceil \log_2 N \rceil;$$

в нашем случае $m=3$.

Составим кодированную таблицу переходов (табл. 20.17), которая будет содержать шесть строк (по числу состояний автомата), а в столбцах запишем состояние триггеров в двух смежных тактах: t и $t+1$. Переход из состояния Q_t в Q_{t+1} происходит под действием входного сигнала. В правых столбцах записываются те значения входных сигналов для D-триггеров, которые осуществляют этот переход. Так, в первой строке записано, что под действием тактового сигнала схема должна перейти из состояния 000 в состояние 001, т.е. первый и второй триггеры должны «перейти из состояния 0 в состояние 0». На основании табл. 20.15 записывается необходимый для этого перехода входной сигнал $D_1 = D_2 = 0$. Триггер 3 должен сменить состояние с 0 на 1. Для этого вход $D_3 = 1$.

Объединяя функции возбуждения по столбцам, получаем, что на вход D_1 должна быть подана логическая единица при наборах 011, 111 и 110 в такте t . Записывая эту функцию в канонической дизъюнктивной форме, получаем

$$D_1 = \bar{Q}_1 Q_2 Q_3 \vee Q_1 Q_2 Q_3 \vee Q_1 Q_2 \bar{Q}_3 = Q_1 Q_2 \vee Q_2 Q_3.$$

Аналогично

$$D_2 = \bar{Q}_1 Q_3 \vee Q_2 Q_3;$$

$$D_3 = \bar{Q}_1 \bar{Q}_2 \vee \bar{Q}_1 Q_3.$$

Полученные выражения можно упростить, если учесть, что два состояния (010 и 101) отсутствуют в таблице, тогда из карты Карно (рис. 20.48, а) следует, что каждую тройку состояний можно объединить с одним из отсутствующих:

$$D_1 = Q_2; \quad D_2 = Q_3; \quad D_3 = \bar{Q}_1.$$

Наконец, необходимо позаботиться о том, чтобы при появлении одной из запрещенных комбинаций (010 или 101) схема автоматически переходила в одно из рабочих состояний. Если на это рабочее состояние не накладывается никаких ограничений, то достаточно изменить состояние любого из трех триггеров. Например, на рис. 20.48, б на вход $\bar{S}$ первого триггера подается сигнал, который переводит схему из состояния 010 в состояние 110, а состояние 101 также сделано неустойчивым: благодаря воздействию на установочный вход второго триггера получаем переход 101—111.

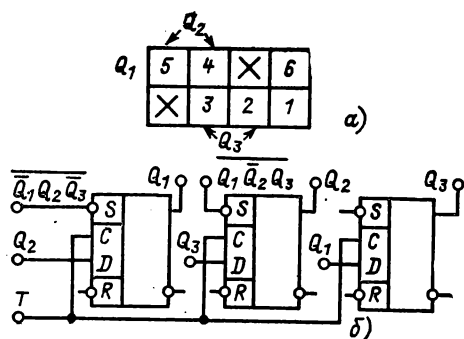


Рис. 20.48. Синтез автомата:

а — последовательность состояний; б — принципиальная схема

Таким образом, можно сформулировать последовательность операций синтеза несложных автоматов:

- 1) определение множества состояний автомата;
- 2) определение минимального числа бистабильных ячеек (триггеров);
- 3) кодирование состояний автомата, т.е. установление однозначного соответствия между каждым состоянием автомата и набором состояний триггеров;
- 4) составление кодированной таблицы переходов;
- 5) описание функций возбуждения триггеров логическими уравнениями и их минимизация с учетом избыточных наборов;
- 6) исключение запрещенных состояний;
- 7) составление принципиальной схемы.

Логические узлы на основе микросхем с повышенной степенью интеграции

Надежность узлов, выполненных на ИМС, во многом определяется числом паяных соединений. Поэтому естественным желанием потребителей было получить такую ИМС, которая одна полностью выполняла бы поставленную задачу. В принципе такой путь возможен, но экономически он становится рентабельным лишь при больших партиях специализированных ИМС. Развитие микроэлектроники выявило следующие возможные пути повышения степени интеграции:

1. Выполнение интегральных схем общего применения со средней степенью интеграции (СИС). К таким схемам относятся уже упоминавшиеся счетчики, регистры, а также комбинационные схемы: дешифраторы, сумматоры, мультиплексоры.

2. Выполнение специализированных схем частного применения со средней степенью интеграции на основе гибридных ИМС.

3. Выполнение интегральных с большой степенью интеграции схем (БИС), внутренняя организация которых допускает перестройку в соответствии с требованиями пользователя. К таким схемам относятся постоянные и репрограммируемые запоминающие устройства (ПЗУ и РПЗУ) и программируемые логические матрицы (ПЛМ).

Использование СИС позволяет получать более компактные схемотехнические решения по числу корпусов ИМС и по числу паяных межсоединений. Применение дешифратора позволяет реализовать логические функции, записанные в ДКФ, путем объединения соответствующих выходов дешифратора логическим элементом ИЛИ. На основе одного дешифратора и нескольких элементов ИЛИ можно реализовать систему логических функций.

Некоторые часто используемые логические функции выполняются специализированными СИС. К таким СИС относятся, например, схемы для управления цифровыми, сегментными или точечными индикаторами. Так, микросхема К514ИД1 для управления цифровыми сегментными индикаторами при подаче на входы наборов переменных, соответствующих цифрам $\overline{ABCD}=0$, $\overline{ABCD}=1$ и т. д., на семи выходах формирует сигналы управления сегментами. Такие СИС выполняют функции преобразователей кодов: каждому набору входных переменных соответствует набор выходов.

Компактные схемотехнические решения удается получать с помощью мультиплексоров. Мультиплексором называют логическую схему-коммутатор (рис. 20.49), где выходы

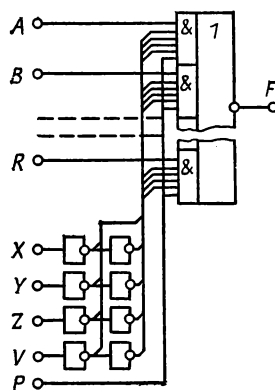


Рис. 20.49. Мультиплексор

нескольких (обычно 4, 8, 16) схем И объединяются схемой ИЛИ либо ИЛИ—НЕ. Каждая из схем И имеет один сигнальный вход ($A, B, \dots, R$), один общий для всех схем И вход разрешения (стробирования) P и входы управления (X, Y, Z, V). Любая комбинация сигналов управления разрешает при $P=1$ передачу на выход F одного из сигналов $A, B, \dots, R$. Таким образом, выходная функция описывается выражением

$$F = (\overline{A} \overline{X} \overline{Y} \overline{Z} \overline{V} \vee B \overline{X} \overline{Y} \overline{Z} V \vee \dots \vee RXYZV)P.$$

Поскольку сигналы управления образуют полную группу наборов (от $\overline{X}\overline{Y}\overline{Z}\overline{V}$ до $XYZV$), мультиплексор рис. 20.49 позволяет реализовать любую ДКФ четырех переменных. Для этого на соответствующую группу сигнальных входов из множества $A, B, \dots, R$ и на вход разрешения P подается константа 1, а на

остальные 0. Например, для реализации функции

$$F = \overline{X} \overline{Y} \overline{Z} \vee XYZV$$

ее следует записать в канонической форме:

$$F = \overline{X} \overline{Y} \overline{Z} \overline{V} \vee \overline{X} \overline{Y} \overline{Z} V \vee XYZV.$$

Поскольку конъюнкции, входящие в ДКФ, открывают логические элементы И с сигнальными входами $A, B, \dots, R$, должны быть обеспечены условия

$$A = B = R = 1; C = D = E = \dots = 0; P = 1.$$

Еще более гибкими возможностями обладают различные полупроводниковые запоминающие устройства. Они делятся на группы: постоянные запоминающие устройства — ПЗУ, ROM (read only memory); оперативные запоминающие устройства — ОЗУ, RAM (random access memory); репрограммируемые запоминающие устройства — РПЗУ.

Всякое ЗУ подобно написанному тексту характеризуется содержимым ячеек памяти и их адресами. Так, в книге можно указать адрес любой буквы с помощью набора цифр: номер страницы, номер строки, номер символа в строке. Содержимое ячейки памяти — буква, которая находится по данному адресу. Подобно этому в полупроводниковом ЗУ мы знаем объем памяти, т. е. число ячеек, в которые могут быть записаны биты информации, и адреса этих ячеек. В каждой ячейке может быть записано от 1 до 8 бит информации.

Различают ПЗУ, программируемые изготовителем, и ПЗУ, программируемые пользователем. Во втором случае первоначально имеют дело с универсальной заготовкой. Эти заготовки позволяют записывать информацию в ячейке, как правило, одним из двух способов: подачей импульса обратного напряжения на некоторые из диодов в узлах матрицы ЗУ. В результате пробоя выбранные диоды хранят информацию в виде малого сопротивления соответствующей ячейки. Другой способ — пропускание импульсов тока через выбранные перемычки, которые вследствие перегорания хранят информацию в виде высокого сопротивления.

Устройство для программирования ПЗУ пользователем содержит кодоборник для набора адреса, генератор импульсов напряжения (тока), устройство считывания и индикации для контроля содержимого ячеек. Однажды использованное ПЗУ восстановлению и перезаписи не подлежит. ПЗУ имеет адресные входы и выходы содержимого ячеек (данные).

ОЗУ, как правило, представляет собой устройство, которое позволяет записать в него любую информацию, хранить ее в течение всего времени, пока включены источники питания (энергозависимые ОЗУ), считывать информацию без разрушения неограниченное число раз, при необходимости — стирать и записывать заново. ОЗУ содержит следующие группы внешних выводов: адрес, управление режимом (запись — считывание), входные дан-

ные при записи, выходные данные при считывании.

РПЗУ также допускает замену информации, однако отличается от ОЗУ тем, что процесс смены информации требует отключения модуля РПЗУ от устройства, в котором оно используется, и присоединения к специальному блоку (программатору), в котором вначале осуществляется полное стирание всей ранее записанной информации, а затем запись новой.

Для одних видов РПЗУ стирание осуществляется воздействием электрического напряжения на соответствующие входы, для других — воздействием на кристалл ультрафиолетовым облучением. Записанная информация хранится достаточно долго и при отключенном питании (десяти тысяч часов); РПЗУ допускают перезапись несколько десятков раз.

Поскольку количество внешних выводов в корпусе микросхемы ограничено, адреса ячеек памяти кодируются. Так, ОЗУ К155РУ5 емкостью 256 бит (256 одноразрядных слов) содержит в корпусе не только матрицу памяти, но и дешифратор с восьмью входами и $2^8 = 256$ внутренними выходами. Тогда каждый адрес представляет собой 8-разрядное двоичное слово, а в адресуемой ячейке содержится 1 бит информации (0 или 1). Возможна и другая организация: в ПЗУ К155РЕЗ адресуются 32 слова по 8 разрядов, т. е. каждая ячейка памяти хранит 8-разрядное слово. Наращивание объема памяти возможно путем модульной организации. Используя восемь корпусов ОЗУ К155РУ5 с общей адресной магистралью, получаем возможность записи и считывания 256 8-разрядных слов по каждому адресу.

ПЗУ, программируемые пользователем, служат в качестве многофункциональных элементов, с их помощью можно реализовать различные логические функции.

Если рассматривать адрес как набор аргументов, то записанная в ячейке информация представляет собой функцию этого набора аргументов.

Для реализации на ПЗУ логической функции

$$F = \overline{X} \overline{Y} \overline{Z} \vee XYZV = \overline{X} \overline{Y} \overline{Z} \overline{V} \vee \overline{X} \overline{Y} \overline{Z} V \vee XYZV$$

в ячейки памяти с адресами 0000, 0001 и 1111 запишем 1, во все остальные ячейки 0. Тогда при обращении к ПЗУ считываемая информация будет соответствовать требуемой функции. Если в каждой ячейке памяти хранится K -разрядное слово, то на одном модуле ПЗУ можно одновременно получать K различных логических функций M аргументов, где M — разрядность адреса.

ПЗУ и РПЗУ можно использовать для построения не только комбинационных схем, но и схем с памятью. Рассмотрим пример построения счетчика с $N = 12$ состояниями, который должен на выходе генерировать заданную последовательность слов, например $7 = 0111, 8 = 1000, 13 = 1101, \dots$ Разрядность адреса $M = 5$, содержимое ячеек памяти должно соответствовать табл. 20.18.

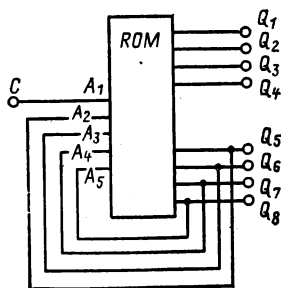


Рис. 20.50. Счетчик на 12 на основе ПЗУ или РПЗУ

В таблице, как следует из схемы рис. 20.50, разряды Q_5 — Q_8 содержимого ячеек памяти реализуют функцию переходов. Вначале (строка 1) обращение по адресу 00000 должно выбрать содержимое ячейки 0000; при появлении на входе $A_1=1$ (строка 2) адрес изменяется, и в ячейке с адресом 10 000 должно быть записано 0001. По цепи обратной связи содержимое передается на вход и изменяет адрес (строка 3). По новому адресу 10001

Таблица 20.18

№	Адрес					Содержимое ячеек							
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
4	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1
5	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1
6	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
7	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

также должно быть записано 0001, что обеспечивает устойчивое состояние счетчика. Переход к $A_1=0$ (4-я строка) вновь изменяет адрес, и в ячейках с адресами 00001 и 00011 должно быть записано 0011. Существенно, что все слова в последовательности адресов и содержимого Q_5 — Q_8 должны быть соседними во избежание опасных состояний.

Другая часть содержимого ячеек памяти (разряды Q_1 — Q_4) используется для получения требуемого набора выходных слов. Так, для строк 2, 3, 4 запишем слово $7=0111$, для следующего входного импульса — 8 и т. д. После составления таблиц переходов и выходов (табл. 20.18) можно составить таблицу записи слов в ПЗУ. Каждому адресу A_1 — A_5 (от 00000 до 11111) соответствует определенное выходное 8-разрядное слово Q_1 — Q_8 . Изыбыточные адреса используют для начальной установки счетчика. Число адресов должно по крайней мере вдвое превышать число состояний счетчика, разрядность ячеек должна по крайней мере вдвое превышать разрядность счетчика. Для приведенного примера можно использовать К155РЕЗ (32 адресуемых слова по 8 разрядов).

Модули ОЗУ, ПЗУ и РПЗУ используются как самостоятельные функциональные узлы, а также как составные части микро-ЭВМ.

Микропроцессоры

Микропроцессором (МП) называют программно управляемое микросистемное устройство, осуществляющее обработку цифровой информации. МП содержит одну или несколько БИС. В случае использования нескольких БИС они должны быть совместимы, т. е. предназначены для совместного применения с общими источниками питания, иметь единую систему логических сигналов, одинаковую разрядность. На основе МП выполняются микро-ЭВМ — устройства, содержащие МП, ЗУ, средства связи с периферийными устройствами (интерфейс), органы управления. Если микро-ЭВМ предназначена для управления некоторым объектом или обслуживания объекта или процесса, то она должна быть снабжена средствами сопряжения с этим объектом (процессом): датчиками, преобразователями аналог — код и код — аналог, исполнительными устройствами. Совокупность микро-ЭВМ и средств сопряжения называют микропроцессорной системой. Микропроцессорная система включает как технические средства (конструкцию с размещенными на ней модулями и магистралями, т. е. группой линий передачи информации), так и программное обеспечение, т. е. последовательность команд (программу либо набор программ), которые хранятся в ЗУ и реализуют требуемую последовательность операций.

Структурная схема микро-ЭВМ содержит (рис. 20.51): устройства ввода и вывода, порты ввода и вывода, центральный процессор ЦП с устройством управления, арифметическо-логическим устройством и основной памятью ЗУ, а также (при необходимости) внешнюю память ВнП. Функциональная схема рис. 20.52 более подробно представляет набор функциональных узлов и связей между ними.

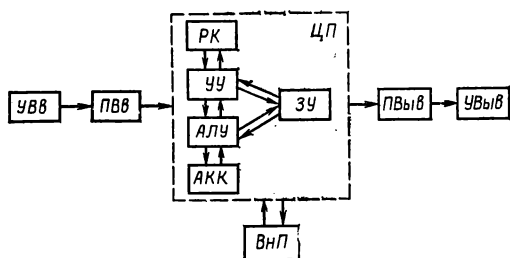


Рис. 20.51. Структурная схема микро-ЭВМ

Устройства ввода $УВв$ (примерный перечень: 1 — гибкий магнитный диск, 2 — аналого-цифровой преобразователь сигналов датчика технологического процесса, 3 — телетайп, 4 — фотосчитывающее устройство с перфолен-той).

Устройства вывода $УВыв$ (примерный перечень: 25 — дисплей, 26 — печатающее устройство, 27 — перфоратор, 28 — цифро-аналоговый преобразователь для управления объектом).

Порт ввода $ПВв$ (5—8 — модули ввода, 9 — селектор).

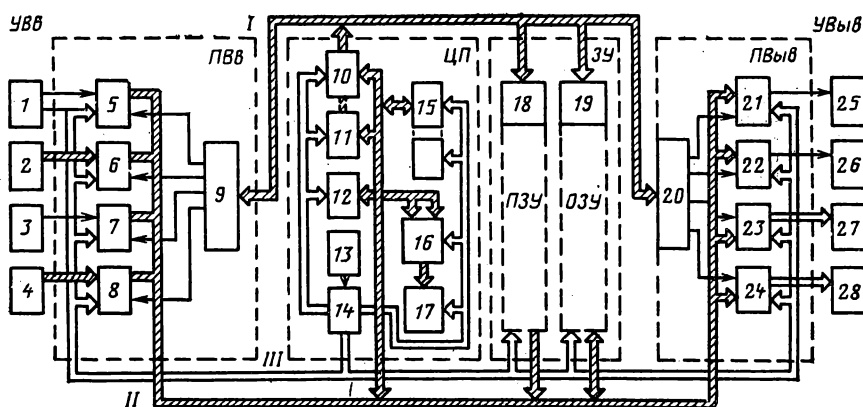


Рис. 20.52. Функциональная схема микро-ЭВМ

Порт вывода $ПВ_{\text{ВВ}}$ (21—24 — модули вывода, 20 — селектор).

Центральный процессор $ЦП$ (10 — регистр адреса, 11 — счетчик команд, 12 — регистр команд $РК$, 13 — генератор синхросигналов, 14 — узел управления $УУ$, 15 — регистры общего назначения $РОН$, 16 — арифметическо-логическое устройство $АЛУ$, 17 — регистр-аккумулятор $Акк$).

Запоминающее устройство $ЗУ$ ($ПЗУ$ с селектором адреса 18 и $ОЗУ$ с селектором адреса 19).

Вся информация, с которой оперирует микро-ЭВМ, представляет собой многоразрядные двоичные слова. Часто используются слова длиной 8 разрядов (1 байт) и кратной длины. Входная информация делится на данные, т. е. числа, над которыми должны быть выполнены некоторые действия, и программу, т. е. последовательность команд, также представляющую собой многоразрядные двоичные слова, которые указывают, какие именно действия должны быть выполнены над данными.

Данные с устройства ввода поступают в порт ввода. Сигналы управления обеспечивают запись их в регистр и временное хранение. Селектор адреса выбирает необходимый порт и обеспечивает передачу данных в магистраль данных. Подобным образом данные обрабатываются и в портах вывода.

Центральный процессор, модули ввода и вывода, запоминающие устройства выполняются в виде одной или нескольких БИС. Поскольку технологические и топологические трудности не позволяют осуществить связь узлов друг с другом по принципу «каждый с каждым», так как для этого потребовалось бы большое количество линий и внешних выводов, в микро-ЭВМ применяется магистральная организация связей. Для передачи информации между модулями и внутри модулей используются линии групповой связи — магистрали (рис. 20.52): I — магистраль адреса, II — магистраль данных, III — магистраль управления.

Каждая магистраль представляет собой группу линий; обычно магистраль данных выполняется 8-разрядной, магистраль адресов — 16-разрядной. Для того чтобы отдельные функциональные узлы могли подключаться к магистрали, используются специальные буфер-

ные усилители, которые могут находиться в одном из трех состояний: передачи данных в магистраль, приема данных из магистрали, состоянии с высоким сопротивлением (отключенное).

Таким образом, внутренним управляющим сигналом один из модулей можно поставить в режим передачи сигналов в магистраль, часть модулей отключить, а другую часть поставить в режим приема информации.

Даже при магистральной организации разрядность данных может оказаться недостаточной для обеспечения требуемой точности, поэтому используются слова двойной длины, передаваемые последовательно по 8 разрядов. Другой путь увеличения информации, передаваемой по магистралям, — мультиплексирование, т. е. совмещение групп выводов БИС двух или более функций. В этом случае по линиям передается различная по виду информация в разные моменты времени, а ее правильное восприятие и использование обеспечивается внутренней (в пределах БИС) коммутацией этих выводов. Оба пути неизбежно приводят к снижению быстродействия микро-ЭВМ.

Типовой модуль $ЦП$ выполнен в виде БИС с 40 выводами. Увеличение числа выводов сложно технологически, поэтому проблема организации большого числа связей при ограниченном числе выводов стоит достаточно остро. Обычно 16 выводов ($A_0—A_{15}$) используется для подключения магистрали адреса, 8 выводов ($D_0—D_7$) для подключения магистрали данных, 5—7 выводов занимают источники питания и сигналы синхронизации.

Остальные выводы (около 10) служат для обмена сигналами управления.

Для того чтобы работа быстродействующего центрального процессора при выполнении программы была независимой от входных устройств, данные и программа должны быть записаны в основную память. Основная память (полупроводниковые $ЗУ$) делится на две части: память данных ($ОЗУ$) и память программ ($ПЗУ$). Кроме того, в $ОЗУ$ хранятся промежуточные и окончательные результаты работы $ЦП$ до их вывода. Объем основной памяти для разных микро-ЭВМ составляет единицы Кбайтов (1 Кбайт = $1024 = 2^{10}$ восьмираз-

рядных слов). Внешняя память используется для долгосрочного хранения больших объемов информации (данных, программ и результатов вычислений). Обычно она основана на использовании магнитной ленты (стандартных магнитофонных кассет) и гибких магнитных дисков. На гибком магнитном диске можно хранить до $3 \cdot 10^6$ бит.

Кроме основной и внешней памяти в микро-ЭВМ имеется несколько регистров памяти для оперативного хранения информации. В ЦП, а также в УВв, УВыв регистры используются для временного хранения промежуточных результатов и команд. Объем этой памяти невелик (десятки байтов), однако она позволяет существенно повысить быстродействие благодаря простоте обращения к регистровой памяти (сверхоперативное ЗУ—СОЗУ).

Основным функциональным узлом ЦП является АЛУ, которое входит составной частью в модуль ЦП либо выполняется в виде специализированной БИС.

АЛУ представляет собой многофункциональную комбинационную логическую схему, которая может в зависимости от сигналов управления выполнять над двумя числами (операндами) арифметические или логические операции. Обычно АЛУ выполняют следующие логические операции: И, ИЛИ, ИЛИ—НЕ, сложение по модулю два; арифметические операции: сложение (вычитание), сдвиг, умножение. Операнды хранятся или в основной памяти, или в регистрах ЦП, или чаще всего один из операндов хранится в аккумуляторе, а другой поступает из регистра. После выполнения операции результат записывается в аккумулятор, а число, которое хранилось там ранее, стирается. Таким образом, на входы АЛУ поступают числа и код операции, которая должна быть выполнена с этими числами.

Последовательность операций, выполняемых процессором, включает:

считывание команды из памяти; первоначально код команды заносится в счетчик команд 11, после выполнения каждой команды число в счетчике автоматически увеличивается на 1 (инкрементируется), обеспечивая последовательный выбор команд (возможно изменение этой последовательности, для чего существуют команды переходов);

в соответствии с кодом команды происходит считывание из памяти следующей информации (2 или 3 байта): кода операции (1 байт), которая должна быть выполнена в соответствии с данной командой, и чисел, над которыми эта операция производится, либо адресов этих чисел в памяти данных;

после выполнения операции происходит считывание следующей команды, и цикл повторяется.

Устройство управления УУ, которое входит в состав ЦП, обеспечивает с помощью генератора тактовых сигналов требуемую последовательность выполнения операций. Частота генератора ограничивается физическими процессами в интегральных схемах и в зависимости от типа микропроцессора лежит в пределах 0,5—40 МГц.

Для управления передачей информации и обеспечения необходимых задержек обычно используются не одна, а две или более последовательностей импульсов, соответствующим об-

разом сфазируемых между собой. Выполнение одной команды происходит за несколько (1—5) машинных циклов; каждый цикл содержит несколько периодов тактового генератора.

Цикл команды содержит две фазы: выборки и исполнения. В первой фазе в соответствии с кодом в счетчике команд команда вызывается из ПЗУ и для временного хранения помещается в регистр команд, а счетчик команд инкрементируется. Во второй фазе команда выполняется. Блок управления дешифрует содержание регистра команд для определения операции, которая должна выполняться в АЛУ, и определяет местонахождение операндов (ОЗУ, РОН, аккумулятор).

Ввод программ и данных

Для того чтобы микро-ЭВМ начала работать, необходимо ввести программу и загрузить в память данные. Поскольку микропроцессор, как и всякая логическая микросхема, оперирует с бинарными сигналами, наиболее естественным представляется использование многоразрядных двоичных слов. Так, команда: «послать в аккумулятор содержимое ячейки памяти с номером 16000» имеет формат 3 байта: 0011 1010 0011 1100 1000 0000.

Первый байт — код операции «послать в аккумулятор», следующие два — двоичное число, соответствующее номеру ячейки 16000. Недостатки такого способа написания программ: трудно запомнить коды операции; написанная программа плохо воспринимается; при составлении и вводе вероятны ошибки.

Некоторое упрощение написания дает использование шестнадцатеричной системы счисления.

Она содержит символы: 0, 1, 2, ..., 9, А, В, С, D, E, F, каждый символ соответствует четырем битам — от 0000 до 1111. Та же команда запишется короче: 3А 3С80. Здесь 3А — код операции, 3С80 — число, соответствующее десятичному 16000. Набрать команды можно с помощью шестнадцатеричной клавиатуры, однако чтобы машина смогла их воспринимать, они должны быть превращены устройством ввода в бинарные сигналы.

Более удобна система записи программ на языке ассемблера, поскольку он допускает представление всех команд в форме, отражающей их содержательный смысл, например команда ADD — сложение, SUB — вычитание, MOV — передача данных. Программа набирается на клавиатуре либо вводится с перфоленки или иного носителя. Преобразование такой программы в объектную, т. е. в последовательность машинных команд, осуществляется специальной программой. Она может размещаться непосредственно в ПЗУ микро-ЭВМ, занимая 8—16 Кбайт, и в этом случае называется резидентным ассемблером, либо в ПЗУ иной, более мощной машины (кросс-ассемблер). Кросс-ассемблеры могут использоваться для записи исходной программы на языках высокого уровня, обеспечивающих более простое программирование, хотя не всегда оптимальное в смысле затрат памяти и времени выполнения.

Так, программа записи в аккумулятор большего из двух чисел, хранящихся в ячейках *x* и *y*, на языке ассемблера составляет около 15 команд (очистить аккумулятор, записать в

Т а б л и ц а 20.19

Серия	Число функциональных модулей	Технология	Быстродействие	Напряжение питания, В	Рабочая температура, °С
KP580	7	n-МДП	$f_T=2,5$ МГц	$\pm 5, +12$	$-10 \div +70$
K589	9	ТТЛШ	$t_{\text{ц}}=0,2$ мкс	5	$-10 \div +70$
K582	11	И ² Л	$t_{\text{ц}}=1,75$ мкс	1,3	—
K583	8	И ² Л	$t_{\text{ц}}=1$ мкс	1,4	—
K584	3	И ² Л	$t_{\text{ц}}=1$ мкс	1,4	$-10 \div +70$
KP581	8	n-МДП	$t_{\text{ц}}=400$ нс	$\pm 5, +12$	$-10 \div +70$
K586	5	n-МДП	$f_T=2,0$ МГц	$\pm 5, +12$	—
KP587	4	К-МДП	$t_{\text{ц}}=2$ мкс	9	$-60 \div +85$
KP588	5	К-МДП	$f_T=1$ МГц	5	$-60 \div +85$
K536	12	p-МДП	$t_{\text{ц}}=10$ мкс	5	$-10 \div +55$
K1800	4	ЭСЛ	$f_T=36$ МГц	$-5, -2$	—
KP1802	6	ТТЛШ	$t_{\text{ц}}=50$ нс	5	$-10 \div +70$
KP1804	6	ТТЛШ	$t_{\text{ц}}=12$ нс	5	$-10 \div +70$
K1810	1	n-МДП	$f_T=5$ МГц	5	—

аккумулятор первое число и т. д.), на языке высокого уровня эта программа запишется так: если $x > y$, то $x \rightarrow A$, иначе $y \rightarrow A$.

Система команд ассемблера обычно содержит несколько десятков простых команд, которые объединяются в группы:

- команды межрегистровых передач;
- команды арифметических операций (сложение, вычитание, сравнение чисел);
- команды логических операций и сдвигов (поразрядная дизъюнкция, конъюнкция и др.);
- команды передачи управления, необходимые при разветвлении: в зависимости от выполнения некоторого условия приходится выполнять не следующую по порядку команду, а команду, находящуюся в другой ячейке памяти программ;
- команды управления микропроцессором (останов, разрешение прерываний для обработки приоритетных данных, поступающих с периферийных устройств).

Для решения задачи с помощью микро-ЭВМ обычно выполняют следующие этапы подготовки:

- описание и анализ задачи;
- составление алгоритма решения задачи;
- составление детальной блок-схемы решения;
- размещение команд по адресам ячеек памяти;
- выделение ячеек основной памяти и регистров СОЗУ для хранения переменных;
- составление программы на языке ассемблера;
- трансляция программы, т. е. превращение ее в последовательность машинных команд и ее отладка;
- загрузка отлаженной программы в ПЗУ;
- разработка аппаратных средств микро-

ЭВМ и интерфейса, т. е. устройств сопряжения микро-ЭВМ с органами управления.

В табл. 20.19 приведены основные данные о наиболее распространенных сериях отечественных микропроцессоров [13].

Список литературы

- 20.1. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник/А. В. Баюков, А. Б. Гитцевич, А. А. Зайцев и др.: Под ред. Н. Н. Горюнова. М.: Энергоатомиздат, 1984. 744 с.
- 20.2. Транзисторы для аппаратуры широкого применения. Справочник/К. М. Брежнева, Е. И. Рантаман, Т. И. Давыдов и др.: Под ред. Б. Л. Перельмана. М.: Радио и связь, 1981. 656 с.
- 20.3. Интегральные микросхемы. Справочник/Б. В. Тарабрин, Л. Ф. Луний, Ю. Н. Смирнов и др.: Под ред. Б. В. Тарабрина. М.: Радио и связь, 1985. 528 с.
- 20.4. Агаханян Т. М. Интегральные микросхемы. М.: Энергоатомиздат, 1983. 464 с.
- 20.5. Достал И. Операционные усилители: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 512 с.
- 20.6. Балашов Е. П., Пузанков Д. В. Микропроцессоры и микропроцессорные системы/Под ред. В. Б. Смолова. М.: Радио и связь, 1981. 328 с.
- 20.7. Алексенко А. Г., Галицин А. А., Иванников А. Д. Проектирование радиоэлектронной аппаратуры на микропроцессорах. Программирование, типовые решения, методы отладки. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
- 20.8. ГОСТ 17021-75. Микросхемы интегральные. Термины и определения.
- 20.9. ГОСТ 17467-75. Микросхемы интегральные. Основные размеры.
- 20.10. ГОСТ 2.743-82 (СТ СЭВ 3735-82). Обозначения условные графические в схемах. Элементы цифровой техники.
- 20.11. ГОСТ 2.759-82 (СТ СЭВ 3336-81). Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники.
- 20.12. Прейскурант № 36-01. Оптовые цены на микросхемы и микромодули. М.: Прейскурантиздат, 1979. 288 с.
- 20.13. А. В. Горячев, А. А. Шишкевич. Микропроцессоры, вып. 6. М.: Высшая школа, 1984. 120 с.

Раздел 21

РЕЗИСТОРЫ, КОНДЕНСАТОРЫ И РЕАКТОРЫ

СОДЕРЖАНИЕ

21.1. Резисторы	131	саторы (153). Конденсаторы для силовых полупроводниковых преобразователей (155). Выбор конденсаторов для работы в режимах, отличных от оговоренных в ТУ (157)	
21.2. Конденсаторы	146	21.3. Реакторы	160
Общие сведения о силовых конденсаторах (146). Конденсаторы для электроустановок переменного тока промышленной частоты (147). Конденсаторы повышенной частоты (149). Конденсаторы для емкостной связи, отбора мощности и измерения напряжения (150). Фильтровые конденсаторы (152). Импульсные конденсаторы (153). Конденсаторы для силовых полупроводниковых преобразователей (155). Выбор конденсаторов для работы в режимах, отличных от оговоренных в ТУ (157)		Назначение и классификация (160). Преобразовательные реакторы (160). Конструкция реакторов (163). Расчет и выбор основных параметров реакторов переменного тока (164). Выбор основных размеров и расчет бетонных токоограничивающих реакторов (170). Сдвоенные реакторы (175). Реакторы, выпускаемые в СССР (176)	
		Список литературы	180

21.1. РЕЗИСТОРЫ

Общие сведения

Резисторы¹ и реостаты широко применяются в разнообразных схемах управления электрическими силовыми установками, где выполняют различные функции. По назначению резисторы и реостаты делятся на следующие основные группы:

а) нагрузочные — применяются для поглощения части электрической энергии цепи и преобразования ее в тепловую энергию, а также для регулирования нагрузки при испытании электрических устройств;

б) пусковые — предназначены для пуска электрических двигателей и ограничения их пускового тока, а также для его поддержания на заданном уровне при разгоне двигателя;

в) пускорегулирующие — кроме пуска электрических двигателей выполняют функции регулирования в известных пределах частоты их вращения;

г) регулировочные и установочные (например, регуляторы возбуждения) — предназначены для регулирования тока в обмотках возбуждения электрических машин, а также для его установки на заданное значение;

д) тормозные — служат для снижения тормозного тока электрических машин, а также для поддержания его заданного значения в период торможения;

е) добавочные — предназначены для снижения напряжения на электрических устройствах, последовательно с которыми они включены;

ж) специальные (экономические, балластные, нагревательные, разрядные, заземляющие, переходные, демпферные и др.) — имеют различные назначения в электрических силовых установках.

¹ Употреблявшийся ранее термин «сопротивление» обозначал как элемент электрической цепи, так и его физическое свойство. С 1962 г. для обозначения сопротивления как элемента электрической цепи введен термин «резистор». Термин «сопротивление» употребляется для обозначения физического свойства изделия.

По электрическим характеристикам резисторы и реостаты могут быть низкого напряжения (до 500 В) и высокого напряжения (свыше 1000 В), малоамперные (до 10 А в продолжительном режиме) и многоамперные (свыше 10 А), низкоомные (до 10 Ом) и высокоомные (свыше 10 Ом), линейные и нелинейные.

По режимам работы в электрических цепях резисторы и реостаты делятся на работающие в продолжительном режиме, кратковременном, повторно-кратковременном, перемежающемся и др.

По способу охлаждения резисторы делятся на резисторы с естественным и искусственным охлаждением. У первых отвод тепла осуществляется за счет излучения и естественной конвекции воздуха, у вторых — за счет потока воздуха, нагнетаемого принудительно с помощью вентилятора. Кроме воздушного применяют масляное и водяное охлаждение реостатов. Резисторы и реостаты состоят из ряда отдельных электрически связанных между собой резистивных элементов разнообразной конструктивной формы, выполненных из материала с высоким электрическим сопротивлением. Материалы, идущие на изготовление резистивных элементов резисторов и реостатов, должны обладать высоким удельным электрическим сопротивлением, малым температурным коэффициентом сопротивления и высокой допустимой температурой нагрева. Кроме того, в ряде случаев требуется применение материала с высокой стабильностью сопротивления (допустимое отклонение от расчетных значений сопротивлений не должно превышать $\pm 10\%$ для константана, никрома, феррохромалюминевых сплавов и $\pm 15\%$ для чугуна и стали), с малой чувствительностью к механическим сотрясениям и к атмосферным условиям по ГОСТ 17516-72. Все материалы, применяемые для изготовления резистивных элементов резисторов и реостатов, должны быть технологичными (возможность изготовления различных конструктивных форм, сваривание и т. д.). Наибольшее распространение получили проводниковые материалы (см. разд. 14): константан (типа МНМц 40-15, ГОСТ 5307-77), манганин (типа МНМц 3-12), хромоникелевые сплавы (ГОСТ 12766.1-77 — 12766.5-77); же-

лезохромоалюминиевые (типа Х13Ю4), хромоалюминиевые (типа Х23Ю5 и Х27Ю5Т), а также литейный чугун ГОСТ 4832-80 и электротехническая сталь (ГОСТ 3836-83). Допустимая температура нагрева таких материалов достигает примерно 1200 °С. Однако допустимая температура нагрева резистора или реостата нередко определяется нагревостойкостью изоляции или среды, с которой соприкасаются резистивные элементы.

Для изготовления резисторов и реостатов применяются изоляционные материалы, обладающие одновременно хорошими тепловыми, механическими и диэлектрическими свойствами (см. разд. 13). К таким материалам в первую очередь относятся: фарфор, стеатит СПК-2 и ситалл, обладающие способностью выдерживать резкий перепад температуры, слюда, стекло, асбестоцемент, асбест, стекловолокнит (марок АГ-4В и АГ-4С по ГОСТ 20437-75), стеклотекстолит (марок СТ и СТ-1), текстолит (марок Б, Г по ГОСТ 5-78), фенолит (марок К-17-23, К-17-36 и др. по ГОСТ 5689-79), пластмассы (марок 01-040-02, 03-010-02, КМК-218, ПК-10) и др.

По способу изготовления резистивного элемента с учетом технологических и конструктивных признаков резисторы делятся на:

а) литые — изготавливаются из специального чугуна или стали в форме плоского зигзага;

б) штампованные плоские — выполняются из листового материала с высоким омическим сопротивлением и со специальными прорезями для увеличения сопротивления;

в) штампованные ленточные — изготавливаются из материала с высоким электрическим сопротивлением в виде отдельных соединенных между собой полос или непрерывной ленты, выполненной в форме зигзага;

г) витые круглые проволоочные — выполняются из проволоки высокого электрического сопротивления, навитой на круглый изоляционный стержень;

д) витые круглые ленточные — изготавливаются из ленты с высоким электрическим сопротивлением, навитой на ребро в форме цилиндрической спирали;

е) витые овальные проволоочные — выполняются из проволоки, навитой на изолированный каркас, который имеет в сечении форму овала;

ж) витые овальные ленточные — изготавливаются из ленты с высоким электрическим сопротивлением, которая закрепляется на изолированном каркасе, имеющем в сечении форму овала;

з) плетеные плоские проволоочные — выполняются из проволоки высокого электрического сопротивления, сплетенной в виде сетки.

В зависимости от выполняемых функций и условий работы резисторы и реостаты делятся на вибростойкие и невибростойкие, на открытые и защищенные, водонепроницаемые и взрывобезопасные.

К резисторам и реостатам, применяемым в силовых электроустановках, предъявляются следующие основные требования:

- 1) высокой эксплуатационной надежности;
- 2) стабильности параметров;
- 3) постоянной готовности к работе;

4) высокой механической и электрической износостойкости;

5) коррозионной стойкости;

6) пригодности к работе с большой частотой включений;

7) удобства сборки, монтажа и ремонта.

Из дополнительных требований, предъявляемых к резисторам и реостатам, следует выделить следующие:

1) допустимое отклонение сопротивления при 20 °С для резистивного элемента резистора и реостата не должно отличаться от номинального больше чем на $\pm (10 \div 15) \%$;

2) суммарное контактное сопротивление всего комплекта резистора (реостата), состоящего из отдельных резистивных элементов, не должно превышать сумму сопротивлений резистивных элементов более чем на 4 %;

3) кратковременное отклонение температуры резистора (реостата) от допустимой не должно вызывать остаточной деформации элементов, а также уменьшения изоляционных расстояний;

4) электрическая прочность изоляции резисторов должна удовлетворять требованиям МЭК и ГОСТ 2933-83 на испытательные напряжения;

5) резисторы и реостаты должны выдерживать пятикратный номинальный ток в течение 0,1 с (если отсутствуют специальные требования по электродинамической и термической стойкости);

6) предельные температуры резистивных элементов не должны быть больше значений, указанных в ГОСТ 9219-75 и в требованиях МЭК, а в случае соприкосновения токоведущих частей с изоляцией максимальная температура не должна превышать допустимой температуры для изоляционных материалов в соответствии с требованиями ГОСТ 8865-70.

Конструктивные особенности резистивных элементов

1. Литые и штампованные плоские резистивные элементы. Литые плоские резистивные элементы изготавливаются из специального легированного чугуна с удельным сопротивлением 0,75—0,86 мкОм·м (ГОСТ 4832-80). Конструктивно они выполнены зигзагообразно с дополнительными приливами с проушинами или отверстиями, которые служат для их крепления в блоках резисторов.

Штампованные плоские резистивные элементы изготавливаются из высокоомных жаропрочных сплавов типа марганца, никрома, железохромоалюминиевых, хромоалюминиевых и других подобных им или штампуются из листовой электротехнической стали (ГОСТ 3836-83) в форме прямоугольника с чередующимися просечками, выполненными с целью увеличения сопротивления. Для повышения жесткости штампованного элемента применяются специальные стальные обоймы, надетые на просеченные стороны резистивного элемента и изолированные от активной части асбестобумагой или миканитом. Крепление штампованных резистивных элементов осуществляется на двух изолированных шпильках. Допустимое превышение температуры изоляции не должно превышать 150 °С.

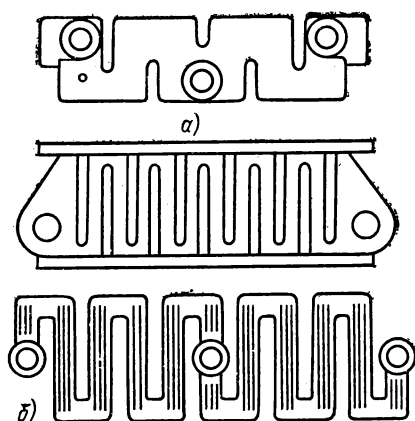


Рис. 21.1. Примеры исполнения литых (а) и штампованных (б) плоских резистивных элементов

На рис. 21.1 приведен пример исполнения литых и штампованных плоских резистивных элементов типов ГФ и ШЭ. Литые плоские резистивные элементы применяются в блоках резисторов типов СЖ, ЯС, ЯСГ и Е. Технические параметры отечественных литых резистивных элементов в блоках резисторов типа СЖ приведены в табл. 21.1.

Основные параметры резистивных элементов ШЭ приведены в табл. 21.2. Они используются в блоках резисторов типов СВ и К.

2. Штампованные ленточные резистивные элементы. Ленточные резистивные элементы по исполнению делятся на две основные группы: элементы из непрерывной ленты, изогнутой зигзагообразно, и элементы из отдельных полос, сваренных между собой. В качестве резистивного материала служит жаропрочная лента с высоким удельным сопротивлением 0,4—2,0 мкОм·м и рабочей температурой 350—850 °С и выше. Толщина материала — от 0,2 до 2,0 мм, ширина — от 30 до 80 мм.

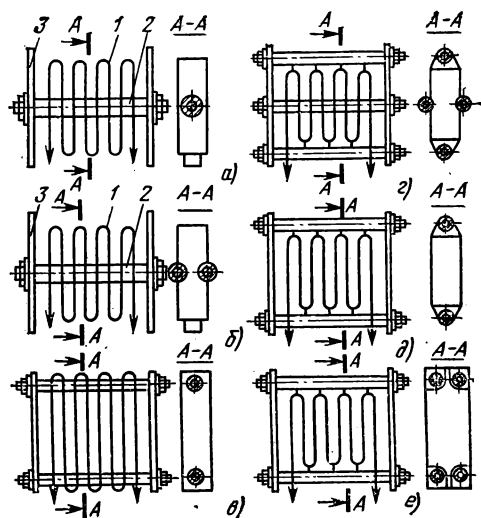


Рис. 21.2. Основные схемы крепления ленты резистора к каркасу

С целью повышения механической прочности ленточных резистивных элементов на прямолинейных участках ленты штампуются продольные ребра жесткости.

Ленточные резисторы различаются способом крепления ленты к каркасу и ее изоляцией. Схемы крепления изображены на рис. 21.2. Их можно разделить на две группы. Резисторы первой группы (рис. 21.2, а—г) отличаются тем, что у них резистивный элемент непосредственно соприкасается с изоляцией, у резисторов второй группы (рис. 21.2, д, е) лента удалена от изоляции на 10—20 мм.

Обладая более высокими технико-экономическими показателями (за счет роста удельной мощности элементов), резистивные элементы второй группы сложнее в изготовлении и менее

Таблица 21.1. Литые резистивные элементы СЖ

Тип	Сопротивление при 20 °С, Ом	Продолжительный допустимый ток, А	Кратковременная токовая нагрузка, А		Постоянная времени, мин	Масса, кг	Число проушин
			10 мин	5 мин			
СЖ60	0,0044	220	360	465	14—16	1,77	2
СЖ61	0,0057	190	325	420	14—16	1,45	2
СЖ62	0,0075	160	270	360	14—16	1,5	2
СЖ63	0,0095	140	225	310	14—16	1,3	3
СЖ64	0,0145	120	190	255	14—16	1,3	3
СЖ65	0,0215	95	135	200	14—16	1,2	3
СЖ66	0,0325	72	100	150	14—16	1,3	3
СЖ67	0,0495	60	75	115	14—16	1,2	3
СЖ68	0,06	55	60	100	14—16	1,3	3
СЖ69	0,091	46	50	80	14—16	1,3	3

Таблица 21.2. Штампованные резистивные элементы ШЭ

Тип	Сопротивление при 20 °С, Ом	Постоянная времени, мин	Продолжительный допустимый ток, А	Кратковременная нагрузка, А						Превышение температуры, °С
				60 с	30 с	20 с	10 с	5 с	2 с	
ШЭ1	0,042	2	35	55	75	90	125	175	290	150
ШЭ2	0,021	4	50	105	138	175	250	350	580	150
ШЭ3	0,014	6	60	155	210	250	350	500	860	150

технологичны по сравнению с резистивными элементами первой группы.

Примером конструкции резистивного элемента, выполненного по схеме рис. 21.2, а, служит ленточный резистивный элемент типа ЛФ1. Активная часть элемента представляет собой непрерывную железохромоалюминиевую ленту 1, изогнутую в форме змейки и укрепленную на одной изолированной стяжной шпильке 2 между двумя боковинами 3. Выводы привариваются к ленте латунью Л-62 или меднофосфористым припоем и укрепляются на стяжной шпильке 2. Недостатками данной конструкции являются: повышенный нагрев в месте крепления ленты к стяжной шпильке и невозможность выполнения промежуточных выводов.

Резистивный элемент по схеме рис. 21.2, б выполнен из непрерывной широкой ленты 1, изогнутой зигзагообразно и зажатой с боков между керамическими изоляторами, нанизанными на двух шпильках 2. Концы шпилек закреплены в стальных боковинах 3: с одной стороны жестко, а с другой — с некоторой свободой перемещения для компенсации возможного линейного удлинения за счет нагрева частей резистивного элемента. Выводы резистивного элемента крепятся к ленте стальными пластинами, расположенными на шпильках.

Недостаток данного конструктивного исполнения — резистивный элемент имеет только два крайних вывода. Примером резистивного элемента, выполненного по данной схеме, служит элемент ЛФ2.

Резистивные элементы типа СФ80 выполнены из отдельных жаропрочных пластин по схеме рис. 21.2, г. Пластины соединены последовательно при помощи перемычек, приваренных к концам полос ленты контактным способом. Между рядами пластины разделены кера-

мическими изоляторами или параллельными изоляционными перегородками. Выводы выполнены в разъемном исполнении, что позволяет легко осуществить промежуточный подвод.

Резистивные элементы второй группы схем крепления удалены от изоляции с помощью металлических держателей, соединенных с лентой сваркой или клепкой (элемент типа ЛФ10), или с помощью удлиненных концов отрезков ленты (элементы типа ЛФ2 и ЛФ).

Оптимальной конструкцией ленточного резистивного элемента как с технологической точки зрения, так и по технико-экономическим показателям является конструкция элемента ЛФ. Этот элемент изготавливается из непрерывной железохромоалюминиевой ленты шириной 60 и толщиной 0,25—1,1 мм. Шаг между витками у резистивного элемента ЛФ равен 10—12 мм. Длина прямолинейных участков ленты между перегибами равна 300 мм. Число витков в зависимости от мощности резистивных элементов колеблется от 20 до 60.

Отличительной особенностью резистивного элемента ЛФ является способ крепления ленты к каркасу с помощью стальных держателей. С этой целью места перегибов ленты выполняются П-образной формы, на верхней полке которых с помощью двух усов закрепляются Г-образные держатели. Держатели крепятся в специальных изоляторах, которые после их стяжки совместно с концевыми изоляторами и боковинами образуют жесткий каркас с требуемым каналом для прохода охлаждающего воздуха.

Конструктивное исполнение крепления ленты к каркасу позволяет получить любое количество выводов в пределах числа витков.

К резистивным элементам второй группы относится и элемент типа ВВС, отличительной

Таблица 21.3. Штампованные ленточные резистивные элементы из материала Х13Ю4 с удельным сопротивлением $\rho=1,28 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$

Тип	Сопротивление при 20 °С, Ом	Продолжительность ток, А	Размеры ленты в сечении, мм	Тепловая постоянная времени, мин	Рабочая температура ленты, °С	Габариты, мм	Масса, кг	
							элемента	ленты
ЛФ1	0,32	140	0,5×70	4	450	90×420×665	4,5	2,3
ЛФ2	0,45	140 140 155	0,5×60 0,25×60 0,36×60	4 2 3	450	90×450×600	4,4	2,3
ЛФ10	0,1—0,3	180 270 140 155	0,5×60 1,1×60 0,25×60 0,36×60	4 5 2 3	600	70×425×455	5,6*	1,2*
ЛФ11	0,05—1,0	310 360 540	0,36×60 0,5×60 1,1×60	3 4 5	600	70×790×855	21*	8*
ЛФ11Б	0,1—2,0	180 270 280	0,5×60 1,1×60 0,25×60	4 2 2	600	70×525×625	17**	7,2**
СФ ЛФ8	0,4 0,4	100 100	0,5×60 0,5×60	15 4	300 450	70×380×430 —	10 —	2 —

* Масса указана для ленты 0,5×60 мм.

** Масса указана для ленты 1,1×60 мм.

Т а б л и ц а 21.4. Условия эксплуатации резисторов типов ПЭ, ПЭВ и ПЭВР

Группа резистора	Относительная влажность	Вибрация		Движение с линейным ускорением, м/с^2 , не более	Удары с ускорением, м/с^2 , не более
		Ускорение, м/с^2 , не более	Частота, Гц		
I	$\leq 95 \div 98\%$ при 40°C	150	50 ± 5	100	1500
II		100	10—1000	50	350
III	$\leq 80\%$ при 25°C	60	10—80	25	120

П р и м е ч а н и е. Допустимая температура $-60 \div +135^\circ\text{C}$.

особенностью которого является способ крепления активной части к корпусу с помощью держателей в виде выступов ленты в местах перегибов с овальными отверстиями на концах. В остальном конструкции резистивных элементов ВВС и ЛФ аналогичны.

Ленточные резистивные элементы при естественном охлаждении необходимо устанавливать горизонтально один над другим в количестве не более четырех в блоке.

На базе штампованных ленточных резистивных элементов выполняются блоки резисторов типов ББС-31, БВД, ЖФ, ГФ и др.

Основные характеристики штампованных ленточных резистивных элементов приведены в табл. 21.3.

3. Витые круглые и овальные проволоочные резистивные элементы и резисторы. Резисторы выполняются из круглой или прямоугольной проволоки высокого сопротивления, намотанной на изоляционный цилиндр или изолированный металлический каркас. По исполнению они делятся на эмалированные и неэмалированные.

К эмалированным резисторам относятся ПЭ, ПЭВ и ПЭВР (ГОСТ 6513-75). Они представляют собой фарфоровую или стеатитовую трубку с намотанной на нее нихромовой, железохромслюдниевой или константановой проволокой, покрытую сверху жаростойкой стекловидной эмалью для защиты от окисления при нагреве, воздействия влаги и случайного повреждения.

По условиям эксплуатации резисторы данного типа делятся на три группы (табл. 21.4).

Резисторы ПЭ (рис. 21.3, а) — проволоочные, постоянные, невлагодостойкие, предназначенные для эксплуатации в условиях, указанных для III группы.

Резисторы ПЭВ (рис. 21.3, б) — проволоочные, постоянные, влагодостойкие, предназначены для эксплуатации в условиях, указанных для I и II групп.

Резисторы ПЭВР (рис. 21.3, в) — проволоочные, влагодостойкие, регулируемые, предназначены для эксплуатации в условиях, указанных для I и II групп. Резисторы данного типа в отличие от ПЭ и ПЭВ имеют в средней части на одной стороне трубки открытый участок проволоки, который служит для изменения сопротивления посредством перемещения по нему хомутика — вывода.

Крепление резисторов к панели выполняется при помощи двух металлических лапок или вертикальной шпильки.

В табл. 21.5 приведены номинальные мощность рассеяния и пределы сопротивления для

Т а б л и ц а 21.5. Основные параметры эмалированных резисторов

Номинальная мощность рассеяния, Вт	Пределы номинальных сопротивлений, Ом		
	ПЭ	ПЭВ	ПЭВР
3,0	—	3,0—510	—
7,5	3,0—5100	1,0—3300	—
10	—	1,8—10 000	3,0—220
15	3,0—5100	3,9—15 000	5,1—220
20	2,4—5100	4,7—20 000	10—430
25	4,7—5600	10—24 000	10—510
30	—	10—30 000	15—1000
40	—	18—51 000	—
50	1,0—16 000	18—51 000	22—1500
75	1,0—30 000	47—56 000	—
100	—	47—56 000	47—2700
150	1,0—51 000	—	—

различных типов эмалированных резисторов.

К неэмалированным резистивным элементам относятся элементы типов СР, ЦФ, СН и РБ.

Резистивные элементы ЦФ состоят из фарфорового цилиндра с намотанной на нем кон-

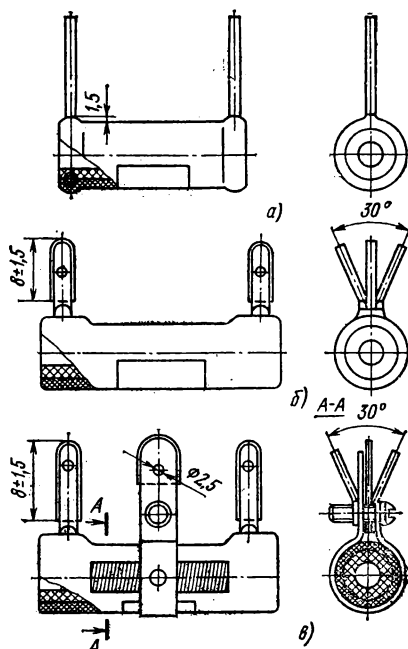


Рис. 21.3. Резисторы ПЭ (а), ПЭВ (б), ПЭВР (в)

стантановой проволокой (ГОСТ 5307-77) или нихромовой проволокой марки Х15Н60 (ГОСТ 12766.1-77).

Основные типы резистивных элементов: ЦФ-146/134, ЦФ-146/82, ЦФ-146/42 (ТУ 16.528, 166-72). Здесь цифры означают: 146 — длина элемента, мм; 134, 82, 42 — числа активных витков проволоки на элементе.

Резистивные элементы типа СН выполняют на плоских металлических каркасах (рамах) с изоляцией активного материала фарфоровыми или стеатитовыми ребристыми изоляторами. В качестве активной части используется проволока: круглая железохромоалюминевая марки Х13Ю4, прямоугольная нихромовая Х15Н60 или константановая по ГОСТ 5307-77.

Основные типы резистивных элементов: СН-270, СН-270л, СН-323 и СН-323л. В элементах СН-270л и СН-323л под ленту устанавливают специальные фарфоровые прокладки: крайние — типа ПФ-60/3 и промежуточные — типа ПФ-60/4 (здесь 60 — длина, мм; 3 или 4 — число желобков).

Резистивные элементы серий СН и ЦФ применяются в электротехнических устройствах постоянного и переменного тока напряжением до 660 В, частотой не более 60 Гц. Резистивные элементы рассчитаны как для продолжительного, так и для кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы в закрытых помещениях. Они соответствуют требованиям ГОСТ 4870-78. Изготавливаются с двумя выводами и одним промежуточным зажимом.

Резистивный элемент РБ выполняется на стальной раме с фарфоровыми изоляторами. Рамы располагаются в блоках вертикально с расстоянием между элементами 80 мм. Резистивный элемент выполнен из константана с числом параллельных проволок в одном витке не более 10.

Резистивные элементы типа СР (ГОСТ 9219-75) представляют собой фарфоровый цилиндр, на наружной поверхности которого в желобчатую канавку навита железохромоалюминевая проволока марки Х13Ю4 (ГОСТ 12766.1-77). К концам проволоки припаяны меднофосфористым припоем медные выводы.

Основные технические данные резистивных элементов типа СР приведены в табл. 21.6.

Вышеперечисленные элементы используются в блоках резисторов типов ЩС, ПП и др.

4. Витые круглые и овальные ленточные резистивные элементы. Резисторы из витых круглых и овальных ленточных резистивных

элементов применяются в общепромышленных установках низкого и высокого напряжения, а также в установках специального назначения.

Резистивные элементы изготавливаются из жаропрочной ленты с высоким удельным сопротивлением (0,4—1,8 мкОм·м), температурным коэффициентом $(5 \div 30) \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и допустимой рабочей температурой 350—1100 °С.

По конструкции резистивные элементы делятся на четыре вида. Первые — типа КФ — имеют узкую ленту шириной 10—20 мм, свернутую на ребро в цилиндрическую спираль. Они выполнены из ленты Х13Ю4 (ГОСТ 12766.5-77), закрепленной на держателе, армированном фарфоровыми или стеатитовыми ребристыми изоляторами. Держатель выполнен из листовой стали толщиной 1,5 мм в виде желоба с проушинами по концам. Выводы выполнены из меди и приварены к ленте меднофосфористым припоем ПМФ или латунью Л-62.

Резистивный элемент КФ-1 отличается от элемента КФ способом крепления ленты, которая удерживается между двумя рядами ребристых стеатитовых изоляторов. Витки ленты КФ-1 закрыты ребрами изоляторов лишь на 5—6 % общей поверхности охлаждения ленты, тогда как у элементов КФ они закрыты на 40—50 %. Это значительно улучшает теплоотдачу элементов КФ-1.

Резистивный элемент КФ-2 отличается от элемента КФ только шириной изоляторов, размер которых уменьшен с 48 до 15 мм. Это приводит к повышению их теплоотдачи примерно на 35 %.

Ленточные витые элементы второго вида выполнены из широкой ленты (40—160 мм), свернутой плашмя по спирали Архимеда. Примером резистора, выполненного на базе элемента второго вида, является резистивный элемент типа ЕлВ. Лента элемента закреплена с помощью восьми радиально расположенных держателей, выполненных из фарфора и зажатых в жестких металлических рамках.

Резистивные элементы третьего вида выполнены аналогично первым, но с овальной навивкой спирали на ребро. Примером этого вида служит резистивный элемент типа СЛ, состоящий из спирали, закрепленной на плоском стальном держателе, армированном фарфоровыми изоляторами. К концам спирали припаяны медные выводы. Резистивные элементы СЛ более компактны, но сложнее в изготовлении, чем элементы КФ.

Резистивные элементы четвертого вида выполнены из узкой ленты, намотанной плашмя. Примером конструктивного исполнения служит резистивный элемент типа СНл. Каркас элемента выполнен из листовой стали и изолирован от активной части специальными ребристыми изоляторами, закрепленными гипсом вдоль его торцов.

На базе резистивных элементов серий КФ, СЛ и СНл выпускаются блоки резисторов типов КФП, КФШ, СКФ, ЯС, СД, ЯСЛ и др.

Блоки резисторов

Блоки резисторов представляют собой электрические аппараты, состоящие из нескольких резисторов, которые соединены по определенной схеме электрической цепи.

Т а б л и ц а 21.6. Резистивные элементы СР

Тип	Сопротивление при 20 °С, Ом	Максимальный продолжительный ток, А	Масса, кг
СР0	215±21,5	1,95	1,0
СР3	23±2,3	3,9	1,05
СР5	11,3±1,13	5,6	0,95
СР8	5,1±0,51	8,25	1,1
СР9	4,1±0,41	9,25	1,12
СР10	5,3±0,53	8,13	0,92
СР13	2,4±0,24	12,1	0,97
СР14	2,0±0,2	13,2	1,0
СР15	1,87±0,18	13,2	1,0

Блоки резисторов различаются по типу резистивных элементов, входящих в их комплект.

К блокам резисторов с литыми плоскими резистивными элементами относятся блоки СЖ с двухрядным расположением элементов (рис. 21.4). Такой блок состоит в зависимости от назначения из 56—112 резистивных элементов 1, закрепленных на изолированных стяжных шпильках 2 между двумя штампованными рамами 3, выполненными из листовой стали толщиной 3—4 мм. Количество резистивных элементов в одном ряду не должно превышать 30—50. Просвет между ними по условиям теплоотдачи выбирается равным 10—15 мм. При использовании блоков СЖ в высоковольтных цепях они изолируются от заземленных частей специальными подвесками 4, укрепленными на опорных изоляторах 5. Выводы 6 из блоков выполнены стальными или медными шинами, зажатými между резистивными элементами.

Основные технические данные блоков резисторов СЖ следующие:

Общее сопротивление, Ом	0,1—10
Номинальное напряжение, В	220—4000
Продолжительный ток, А	46—660
Габариты (максимальные), мм	280×740×750
Масса, кг	80—225
Вентиляция	Естественная
Форма исполнения	Не защищенная

К блокам данного типа исполнения резисторов с литыми плоскими резистивными элементами относятся блоки (старое название — ящики) ЯС-1, ЯС-2, ЯС-3, ЯС-4, ЯСТ-1 и ЯСТ-2, различающиеся по форме и количеству встроенных резистивных элементов, числу ступеней и допустимой нагрузке (ТУ 16.527.213-80Е). Они применяются в качестве пусковых, пускорегулирующих, тормозных, разрядных и других резисторов в силовых электрических цепях с постоянным и переменным напряжением до 500 В.

Резистивные элементы рассчитаны на естественную вентиляцию и устанавливаются гори-

Таблица 21.7. Блоки резисторов с литыми плоскими резистивными элементами

Тип	Число резистивных элементов в блоке	Допустимый продолжительный ток, А	Общее сопротивление, Ом	Масса, кг
ЯС-1	40	39—24	3,0—3,0	27,3—23,1
ЯС-2	20	215—54	0,1—1,6	39,5—23,5
ЯС-3	11	1,2—42	0,2×11—260×11	15,0—20,0
ЯС-4	5	24—215	0,098—6,85	17,0—22,0
ЯСТ-1	12×3	39—24	0,9×3—2,4×3	25,4—21,7
ЯСТ-2	6×3	215—54	0,03×3—0,48×3	36,4—22,6

зонтально. Соединение резистивных элементов в блоках ЯС-1—ЯС-4 последовательное. Допустимое рабочее превышение температуры составляет 265 °С. Допустимая нагрузка 5,2—5,8 кВт.

Блоки состоят из двух боковин, скрепленных двумя изолированными шпильками, на которых смонтированы литые чугунные резистивные элементы ЭС1 и ЭС2. В полках боковин имеются отверстия для соединения блоков между собой и крепления их к месту установки.

Основные технические данные блоков резисторов ЯС-1—ЯС-4, ЯСТ-1 и ЯСТ-2 приведены в табл. 21.7.

Блоки резисторов ЯС101/1У3, ЯС111/1У3, ЯС121/1У3, ЯС131/1У3 (ТУ 16.527.218-80Е) отличаются от ЯС1—ЯС4, ЯСТ-1 и ЯСТ-2 наличием кожуха, предохраняющего от прикосновения к частям, находящимся под напряжением. Составными элементами блоков резисторов данного типа являются резистивные элементы ЭС3. Возможно использование резистивных элементов типа ЭС10. Блоки ЯС101/1У3 и

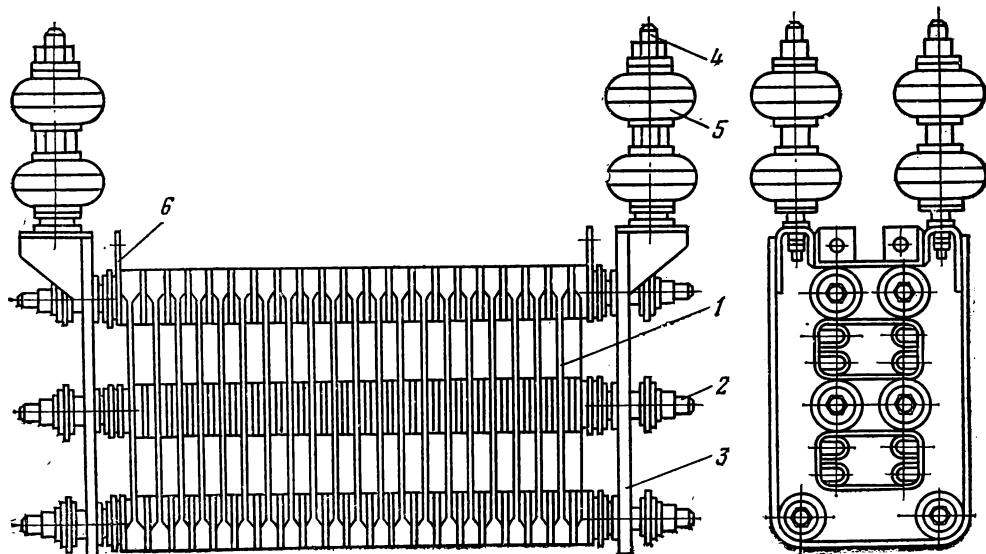


Рис. 21.4. Блок резисторов из резистивных элементов СЖ

Таблица 21.8. Блоки резисторов ЯС

Тип	Количество резистивных элементов в блоке	Резистивные элементы	Масса, кг	Цена 1 шт., руб.
ЯС101/1УЗ ЯС101/2УЗ	7 11	Константановые ЭСЗ	16 22	21,00 18,00
ЯС102/1УЗ ЯС102/2УЗ	3 4	Фехралевые ЭС10	17 21	18,00 21,00
ЯС111/1УЗ ЯС112/1УЗ	1×7 1×3	Константановые ЭСЗ Фехралевые ЭС10	20 21	21,50 23,00
ЯС121/1УЗ ЯС122/1УЗ ЯС131/1УЗ	2×7 2×3 3×7	Константановые ЭСЗ Фехралевые ЭС10 Константановые ЭСЗ	37 40 54	34,00 42,00 45,00
ЯС132/1УЗ	3×3	Фехралевые ЭС10	58	64,00
ЯС123/1УЗ	3 7	Фехралевые ЭС10 Константановые ЭСЗ	39	45,00
ЯС133/1УЗ	6 7	Фехралевые ЭС10 Константановые ЭСЗ	57	65,00
ЯС134/1УЗ	3 7	Фехралевые ЭС10 Константановые ЭСЗ	57	64,00
ЯС191/1УЗ ЯС192/1УЗ	4×7 4×3	Константановые ЭСЗ Фехралевые ЭС10	100 110	75,00 81,00
ЯС211/1УЗ ЯС211/8УЗ	2 16	Константановые ЭСЗ	10 31	16,00 48,50

ЯС111/1УЗ состоят из одной ступени резистора (одноярусные), блоки ЯС121/1УЗ — из двух ступеней резисторов (двухъярусные), блоки ЯС131/1УЗ — из трех ступеней резисторов (трехъярусные).

Технические данные вышеперечисленных блоков приведены в табл. 21.8.

Описанные блоки резисторов применяются в силовых электрических цепях и цепях управления переменного тока частотой 50, 60 Гц напряжением до 660 В и постоянного тока напряжением до 440 В.

Резисторы типа ЯС190 предназначены для включения в цепь с номинальным напряжением до 11 кВ. Они состоят из четырех низковольтных (до 500 В) блоков типов ЯС и ЯСТ, собранных в колонну. Общее падение напряжения в четырехъярусном блоке не превышает 3,2 кВ при продолжительном включении и 4 кВ — при кратковременном. Промышленностью выпускаются блоки резисторов типов ЯС191/1УЗ и ЯС192/1УЗ (табл. 21.8, ТУ 16.527.218-80Е).

Примером исполнения блока резисторов из штампованных плоских резистивных элемен-

Таблица 21.9. Блоки резисторов СВ и СН

Тип	Номинальный ток, А	Мощность, кВт	Количество резистивных элементов	Максимальное число ступеней	Масса, кг	Цена 1 шт., руб.
СВ-1УЗ СВ-2УЗ СВ-3УЗ СВ-4УЗ СВ-5УЗ СВ-6УЗ	100 100 100 100 200 200	5,6 8,0 9,6 12,0 12,0 17,6	28 40 48 60 200—240 300—340	8 8 12 12 12 12	80 94 110 125 159 208	112,00 140,00 156,00 183,00 112,00 138,00
СН-1 СН-2 СН-3 СН-4 СН-5 СН-6 СН-12 СН-16 СН-20 СН-24 СН-28 СН-2/21 СН-3/31 СН-3/32 СН-4/31	100 100 100 100 200 200 400 400 400 400 400 50 200 300 400	1,4 2,0 2,4 3,0 3,0 4,4 12 16 20 24 28 3,8 6,8 7,2 9,0	7 10 12 15 50—60 75—85 6 8 10 12 14 19 34 36 45	8 8 12 12 12 12 17 17 17 17 17 10 10 10 10	16 20 22 26 36 48 140 160 185 210 240 42 68 70 85	21,50 28,90 33,00 40,00 29,50 38,00 170,00 216,00 254,00 297,00 337,00 58,00 95,00 106,00 117,00

тов является блок СВ, состоящий из элементов ШЭ (ТУ 16.527.110-77Е). Блок резисторов набирается из четырех пакетов штампованных резистивных элементов, причем парные пакеты изолируются друг от друга опорными изоляторами, а весь блок укреплен на металлическом основании и изолирован от него четырьмя фарфоровыми изоляторами.

Блоки резисторов СН (ТУ 16.527.071-75Е) выполнены аналогично блокам СВ, но в них отсутствует дополнительная корпусная изоляция, так как они рассчитаны на работу в низковольтных цепях с постоянным напряжением 440 В или переменным 550 В.

Основные технические данные блоков резисторов СВ и СН приведены в табл. 21.9. Номинальный ток резисторов составляет 100—400 А.

На базе ленточных штампованных резистивных элементов изготавливаются блоки резисторов типа ЛФ, которые используются в цепях с относительно большими токовыми нагрузками (порядка 100—500 А), при напряжении выше 1000 В и в случаях, когда при большом числе ступеней требуется небольшое сопротивление (0,005—1,0 Ом).

Блоки резисторов ЛФ (табл. 21.10) состоят из резистивных элементов типов ЛФ-10 и ЛФ-11Б, расположенных горизонтально друг над другом по два — четыре элемента. Резистивные элементы укреплены четырьмя изолированными шпильками, расположенными по углам.

В цепях высокого и низкого напряжения в тех случаях, когда требуется включение большого сопротивления при небольших токовых нагрузках, применяются резисторы из круглых проволочных резистивных элементов. Блоки резисторов типа ПП состоят из резистивных эле-

Таблица 21.10. Блоки резисторов ЛФ

Тип	Количество резистивных элементов	Число ступеней резистора	Сопротивление ступеней резистора, Ом	Продолжительный ток, А	Номинальное напряжение, В	Масса, кг
ЛФ-238	4	6	0,22 0,037 0,019	190 265 400	2000	46,5
ЛФ-269	3	9	0,351 0,132 0,089	100 150 200	3000	46,9

ментов СР. Они включают два элемента СР, закрепленных на асбестоцементной доске с помощью лапок. Изоляция элементов друг от друга рассчитана на номинальное напряжение до 3000 В.

Блоки резисторов типа ШС состоят из резистивных элементов ПЭ, ПЭВ, ПЭВР, СР (ГОСТ 9219-75, рис. 21.5).

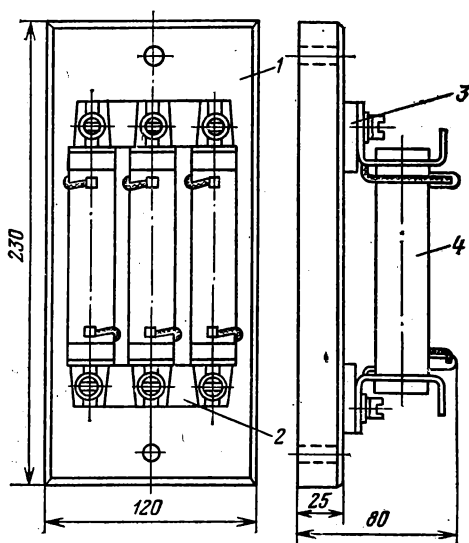


Рис. 21.5. Блок резисторов типа ШС:

1 — панель; 2 — перемычка; 3 — прокладка; 4 — резистивный элемент

Технические данные блоков резисторов ПП и ШС приведены в табл. 21.11.

В электротехнической промышленности широко распространены резисторы из витых круглых ленточных резистивных элементов. Мощность блоков резисторов зависит от количества резистивных элементов и колеблется от 1 до 100 кВт. Сопротивление ступеней резистора — от 0,2 до 30 Ом. К блокам резисторов открытого типа относятся КФП и КФШ, к водозащищенным — СКФ.

Блоки резисторов КФШ состоят из четырех горизонтальных рядов резистивных эле-

Таблица 21.11. Блоки резисторов ПП и ШС

Тип	Количество резистивных элементов	Тип резистивных элементов	Мощность, Вт	Масса, кг
ПП-322	—	СР	—	2,1
ПП-328	—	СР	—	8,0
ШС-41А-1—ШС-41Б-9	1	СР	350	2,6
ШС-42А-3—ШС-42Б-8	2	СР	350	4,2
ШС-43Б-1—ШС-43Г-3	3	СР	350	6,5
ШС-51А-1—ШС-51А-4	1	ПЭ-150	150	1,05
ШС-53А-1—ШС-53А-3	3	ПЭ-150	150	2,9
ШС-54А-1—ШС-54А-2	4	ПЭ-150	150	3,6
ШС-57А-1—ШС-57А-2	7	ПЭ-150	150	6,0
ШС-105В	3	ПЭВ-100	—	1,2
ШС-109А	1	ТСО-36	—	1,0
ШС-114Б-1	2	ПЭВ-75	—	1,0
ШС-60А-6	1	СР	—	4,0
ШС-62А-11	4	СР	—	15,0
ШС-60А-8	1	СР-200	—	4,0
ШС-60А-7	1	СР	150	4,0

ментов по семь элементов в каждом. Мощность с принудительной вентиляцией составляет 190 кВт, без вентиляции 80 кВт.

Блоки резисторов КФП имеют меньшее количество резистивных элементов, расположенных в один или два ряда на двух стальных полосах.

Водозащитный блок резисторов СКФ монтируется в сварном кожухе из листовой стали с гофрированными стенками для увеличения теплоотдачи. Ввод осуществляется через сальники. Блок типа СКФ35-70 рассчитан на допустимую продолжительную нагрузку 1,05 кВт.

Блоки резисторов ЯС и СДЗ состоят из витых овальных резистивных элементов проволочного или ленточного типа (НС или СН, СНЛ) и содержат 2—16 элементов.

Блоки резисторов типа СДЗ рассчитаны на предельно допустимую нагрузку от 0,15 до 5,7 кВт, блоки типа ЯС — от 0,7 до 16,8 кВт.

Наиболее распространенными блоками резисторов общепромышленного и специального назначения являются БТС-1, ББС-2, БКФ, БЛФ-1, БЛФ-2, БТС-7. Они широко используются в электротехнических устройствах в качестве пусковых, тормозных, балластных и других резисторов для крупных электрических двигателей, электровозов, тепловозов и т. д.

Блок тормозных резисторов БТС-1 выполнен из резистивных элементов типа ЛФ11, помещенных в дюралевый кожух с двойными стенками для уменьшения потерь тепла в окружающее пространство.

Блок балластных резисторов ББС-2 состоит из шести рабочих резистивных элементов типа ЛФ11Б, блок пусковых резисторов БКФ — из десяти блоков КФП по 28 резистивных элементов КФ в каждом, блоки резисторов БЛФ-1 и БЛФ-2 выполнены соответственно из резистивных элементов ЛФ1 и ЛФ2, а блок тормозных резисторов БТС-7 — из кольцевых резистивных элементов.

Основные технические параметры вышеперечисленных блоков резисторов приведены в табл. 21.12.

Таблица 21.12. Блоки резисторов

Тип	Количество резистивных элементов	Сопротивление ступени, Ом	Полная мощность, кВт	Максимальная рабочая температура, °С	Масса, кг
БТС-1	12	1,52	2340	600	1020
БТС-2	6	0,52	745	600	505
БКФ	280	0,2—21	2800	350	3150
БЛФ-1	9	2,88	140	450	250
БЛФ-2	9	4,05	220	450	240
БТС-7	5	3,32	1200	750	750

Пусковые и пускорегулирующие реостаты

К данной группе реостатов относятся пусковые и пускорегулирующие реостаты с естественным и масляным охлаждением. Согласно ГОСТ 4871-77 пусковые и пускорегулирующие реостаты постоянного тока с воздушным охлаждением и плоским коммутирующим устройством предназначены или только для пуска, или для пуска и регулирования «вверх» от номинальной частоты вращения электродвигателей постоянного тока мощностью до 100 кВт, питаемых от сети напряжением до 440 В.

Реостаты подразделяются по назначению, условиям пуска, наличию или отсутствию электрической защиты и роду привода.

Основными техническими параметрами пусковых и пускорегулирующих реостатов являются:

номинальные напряжения. Согласно ГОСТ 21128-75 они должны выбираться из ряда напряжений: для пусковых реостатов — 110, 220 и 440 В, для пускорегулирующих реостатов — 110 и 220 В;

номинальные токи коммутирующего устройства, которые выбираются из ряда (ГОСТ 6827-76) 10; 16; 20; 25; 31,5; 40; 63; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400 А.

В зависимости от мощности управляемого электродвигателя изменяется число ступеней реостатов (предварительных и пусковых).

К реостатам этого типа относятся РП, РЗП и РЗР (ТУ 16.527.074-75Е). Они предназначены для управления электродвигателями постоянного тока с параллельным или смешанным возбуждением мощностью до 19 кВт при напряжении сети 110 В и до 42 кВт при напряжении сети 220 или 440 В. Реостаты осуществляют пуск электродвигателя путем изменения сопротивления в цепи якоря.

Реостаты РП (рис. 21.6) делятся на два вида: пусковые типа РП-2500 и пускорегулирующие типа РП-2600.

Минимальная защита реостата осуществляется контактором типа КРМ-200, а максимальная защита — реле типа РЗ-72.

По предельному току нагрузки реостаты типа РП-2500 делятся на четыре группы, реостаты РП-2600 — на три.

Реостаты типа РП состоят из проволочных или ленточных резистивных элементов типов СН, СНЛ и ЦФ. Вместе с коммутирующим устройством они расположены в металлическом корпусе с естественным воздушным охлаждением.

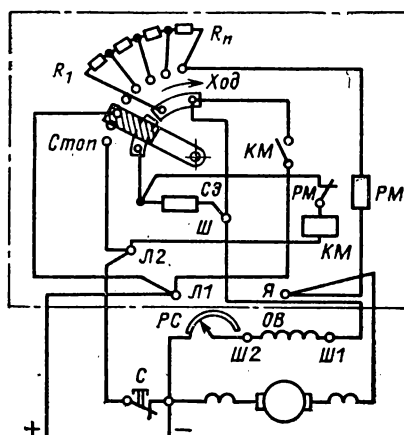


Рис. 21.6. Схема пускорегулирующего реостата типа РП-2511:

КМ — контактор минимального напряжения; РМ — реле максимального тока; РС — реостат возбуждения; СЭ — экономический резистор в цепи катушки контактора; $R_1, R_2, \dots, R_n$ — контакты пускового резистора; Л1 и Л2 — клеммы, присоединяемые к сети; Я — клемма, присоединяемая к якорю электродвигателя; Ш — клемма, присоединяемая к параллельной обмотке возбуждения электродвигателя

ройдом они расположены в металлическом корпусе с естественным воздушным охлаждением.

Контактор предназначен для включения и отключения силовой цепи электродвигателя как при нормальном управлении электродвигателем, так и при действии максимальной и минимальной защит.

Электромагнитное реле постоянного тока мгновенного действия, осуществляющее максимальную защиту, срабатывает при токе в цепи электродвигателя, равном току уставки реле, и размыкает своими контактами цепь катушки контактора.

Реостатами можно производить только пуск и остановку электродвигателя. Они допускают два пуска электродвигателя подряд с паузой после каждого пуска вдвое большей, чем время пуска. На частые пуски реостаты не рассчитаны.

Схема соединения пускового реостата типа РП-2511 с сетью и электродвигателем приведена на рис. 21.6.

Перед пуском электродвигателя стрелка маховичка должна находиться против надписи Стоп. Для пуска электродвигателя медленно переводят маховичок реостата слева направо из положения Стоп в положение Ход. Во избежание перегорания пускового резистора необходимо задерживать маховичок на каждом пусковом положении реостата не более 1,5—2 с. Цепь электродвигателя замыкается при включении контактора, который остается включенным на все время работы электродвигателя.

После включения контактора в цепь его катушки вводится экономический резистор СЭ, сопротивление которого выбирается из расчета снижения тока катушки до значения, достаточного для создания необходимого усилия, удерживающего якорь магнитной системы контактора во включенном положении. При снижении напряжения в сети до 25—50 % своего номинального значения реостат автоматически переводит маховичок в положение Стоп.

нального значения или при его полном исчезновении контактор отключает электродвигатель от сети.

Повторное включение контактора, а следовательно, и новый пуск электродвигателя возможны только после возвращения щетки реостата в положение *Стоп* и последующего поворота маховичка в положение *Ход*.

Максимальное электромагнитное реле РМ постоянного тока типа ЭРЭ-76А мгновенного действия срабатывает при токе в цепи электродвигателя, равном току уставки реле, и при этом размыкает своими контактами цепь втягивающей катушки контактора. Максимальное реле допускает регулировку тока уставки в пределах $(1,5-3) I_{ном}$.

Остановка электродвигателя и отключение его от сети производится быстрым поворотом маховичка против часовой стрелки в положение *Стоп*.

Реостаты РЗП по конструктивному исполнению и основным техническим характеристикам аналогичны реостатам РП. Отличаются наличием в них в качестве реле максимальной защиты реле типа ЭРЭ-71 вместо РЭ-72.

Технические данные пусковых реостатов серий РП и РЗП приведены в табл. 21.13.

Пускорегулирующие реостаты серии РЗР предназначены для управления электродвигателями постоянного тока с параллельным или смешанным возбуждением мощностью до

19 кВт при напряжении сети 110 В и до 38 кВт при напряжении сети 220 В. Изготавливаются в корпусе брызгонепроницаемого исполнения согласно ГОСТ 17516-72. Реостаты данной серии снабжены минимальной и максимальной защитами.

Технические данные реостатов серии РЗР приведены в табл. 21.13.

Реостаты типа ПР (ТУ 16.527.063—69) предназначены для пуска асинхронных электродвигателей с фазным ротором мощностью до 29 кВт. Они состоят из резистивных элементов (проволочных, ленточных или штампованных) и переключающего устройства барабанного типа, встроенных в бак, заполненный трансформаторным маслом.

Реостаты типа РМ (ТУ 16.527.101-76Е) рассчитаны для пуска асинхронных двигателей мощностью 50—500 кВт с роторным напряжением 400—1200 В.

Они состоят из штампованных резистивных элементов и коммутирующего устройства. Расположены в баке, заполненном трансформаторным маслом.

Основные технические параметры реостатов РМ даны в табл. 21.14.

Реостаты возбуждения

Реостаты возбуждения (ГОСТ 4888-77) предназначены для регулирования напряжения генераторов постоянного и переменного тока, частоты вращения двигателей постоянного тока, а также тока в различных электрических цепях при напряжении в цепи возбуждения, не превышающем 440 В.

По роду привода реостаты возбуждения разделяются (ГОСТ 4888-77) на реостаты с непосредственным ручным приводом, с дистанционным ручным приводом и с двигательным приводом.

Реостаты возбуждения изготавливаются на номинальные токи коммутирующего устройства согласно ГОСТ 6827-76 и номинальные напряжения по ГОСТ 21128-75.

Номинальный режим работы реостатов — продолжительный.

К основным типам реостатов возбуждения относятся: Р, РВ, РВМ, РТМ, МР, РЗВ, РШИ, РШМ, РШНД и РПВ.

Реостаты серии Р предназначены для работы в закрытых помещениях и применяются для ручного регулирования возбуждения синхронных генераторов серий С и СГ, электродвигателей постоянного тока с параллельным

Таблица 21.13. Пусковые реостаты РП, РЗП и РЗР

Тип	Номинальный ток, А	Число ступеней		Число резистивных элементов	Масса, кг	Цена, руб.
		пусковых	регулирующих			
РП-2511	30	4	—	2	5,5	19,50
РЗП-2	40	7	—	6	12,0	36,00
РЗП-2А	40	7	—	12	14,0	40,50
РЗП-3	120	8	—	8	18,0	44,50
РЗП-3А	120	8	—	16	18,0	50,00
РЗП-4	200	12	—	6	52,0	90,00
РЗП-4А	200	12	—	10	55,0	100,00
РЗП-4Б	200	12	—	14	60,0	112,00
РЗП-4В	200	12	—	18	65,0	125,00
РЗР-21	40	6	10	6	12,0	37,00
РЗР-21А	40	6	10	12	14,0	44,50
РЗР-31	120	7	15	8	22,0	45,50
РЗР-31А	120	7	15	16	25,0	51,00
РЗР-42	200	10	20	10	50,0	111,00
РЗР-42А	200	10	20	14	55,0	120,00
РЗР-42Б	200	10	20	18	60,0	136,00

Таблица 21.14. Пусковые реостаты РМ

Тип	Номинальный ток, А	Мощность двигателя, кВт	Максимально допустимое роторное напряжение, В	Число ступеней	Масса без масла, кг	Цена, руб.
РМ-1531УЗ	210 250	24,5; 29,5; 40 50; 55	400	8	23,5	38
РМ-1651УЗ	500	150; 175	600	9	70,0	73
РМ-16541УЗ	400	76; 100	600	9	70,0	73
РМ-16641УЗ	400	100	600	9	80,0	78
РМ-1671УЗ	750	300; 410; 500	1200	11	180,0	200
РМ-16761УЗ	600	200; 300	1000	10	145,0	153

возбуждением и генераторов постоянного тока и входят в комплект этих машин.

Реостаты возбуждения серии Р состоят из резистивных элементов и коммутирующего устройства, встроены в кожух из листовой стали с отверстиями для охлаждающего воздуха. Спиральные и рамочные элементы изготавливаются из константановой проволоки.

Неподвижные контакты коммутирующего устройства представляют собой латунные прутки Г-образной формы, расположенные на пластмассовой панели по окружности в один или два ряда. Через отверстие панели в центре окружности контактов проходит ось, на которую надевается пластмассовый рычаг. К рычагу крепится подвижный контакт (щетка), скользящий по неподвижным контактам и контактной шине.

Принципиальная схема включения реостата в цепь возбуждения синхронного генератора с возбудителем приведена на рис. 21.7, б, схема реостата — на рис. 21.7, а.

Основные технические данные реостатов серии Р приведены в табл. 21.15 (ГОСТ 4888-77).

В цепях возбуждения двигателей и генераторов постоянного и переменного тока с напряжением 500 В применяются реостаты типов РЗВ, МР, РВМ, РТМ и РПВ мощностью от 0,3 до 90 кВт.

Отличительной особенностью данных реостатов является отсутствие аппаратов максимальной и минимальной защиты.

Реостаты РЗВ имеют мощность от 0,3 до 4,5 кВт, МР—от 18 до 90 кВт, РВМ и РТМ—

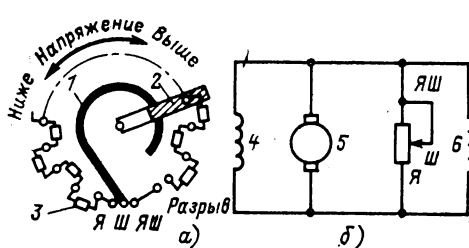


Рис. 21.7. Электрическая схема реостата серии Р (а) и принципиальная схема (б) включения его в цепь возбуждения синхронного генератора:

1 — контактная шина; 2 — рычаг с подвижным контактом; 3 — резистивный элемент; 4 — обмотка возбуждения генератора; 5 — якорь возбудителя; 6 — обмотка возбуждения возбудителя

от 2 до 90 кВт, РПВ—от 0,6 до 0,9 кВт, РВ—от 0,285 до 3,5 кВт (ТУ 16.527.072-75, ТУ 16.527.182-72, ТУ 16.527.171-72 и ГОСТ 4888-77).

Реостаты возбуждения РВМ и РТМ снабжены электроприводом, связанным червячной передачей с подвижной системой коммутирующего устройства. Предусмотрено и ручное управление реостатом. Исполнение — открытое.

Регуляторы МР выполнены по схеме «без отключения».

Реверсивные регуляторы РПВ предназначены для регулирования и изменения направления тока возбуждения генераторов постоянного тока, работающих в системе генератор — двигатель.

Т а б л и ц а 21.15. Реостаты возбуждения

Тип	Мощность, кВт	Номинальный ток, А	Максимальное число ступеней	Число резистивных элементов	Масса, кг	Цена, руб.
Р-21	0,15	—	42	—	1,7	—
Р-22	0,3	—	42; 84	—	4,0	12,70
Р-22Щ	0,3	—	42; 84	—	2,3	—
РВ-5101	0,285	20	10	—	4,0	11,30
РВ-5102	0,57	20	10	—	5,7	12,50
РВ-5103	0,855	20	24	—	7,0	13,30
РВ-522УЗ	0,84	20	30	—	10,0	21,00
РВ-5233УЗ	2,52	20	30	—	31,0	36,50
РВ-5241УЗ	3,5	40	30	—	48,0	48,00
РВМ-1	2,0	30	100	27	56,0	144,00
РВМ-1А	4,0	30	100	54	65,0	166,00
РВМ-1Б	6,0	30	100	81	74,0	186,00
РВМ-2	18,0	60; 120	92; 130	6	175,0	274,00
РВМ-3	54,0	60; 120	92; 130	18	400,0	535,00
РТМ-2	18,0	120	72	6	175,0	321,00
РТМ-3	54,0	120	72	18	400,0	556,00
МР-120	18,0	125; 350	34; 44	6	160,0	280,00
МР-160	24,0	125; 350	34; 44	8	185,0	312,00
МР-200	30,0	125; 350	34; 44	10	205,0	350,00
МР-240	36,0	125; 350	34; 44	12	230,0	390,00
МР-280	42,0	125; 350	34; 44	14	255,0	430,00
МР-360	54,0	125; 350	34; 44	18	385,0	470,00
МР-440	66,0	125; 350	34; 44	22	435,0	550,00
МР-520	78,0	125; 350	34; 44	26	490,0	620,00
МР-600	90,0	125; 350	34; 44	30	540,0	700,00
РЗВ-01А	0,3	15	32	4	6,5	17,00
РЗВ-01Б	0,45	15	32	6	8,0	19,80
РЗВ-11Б	0,65	15; 25	40; 66; 96	9	11,5	27,80
РЗВ-21А	0,9	15; 25	60; 96	12	16,5	30,50
РЗВ-31А	1,2	15	92	16	25,0	45,50
РЗВ-41А	2,5	25; 40	100; 120	10	44,0	89,00
РПВ-01	0,6	10	2×17	8	16,0	33,00
РПВ-02	0,6	10	2×17	8	16,0	33,00
РПВ-11	0,9	10	2×17	12	19,0	34,00
РПВ-12	0,9	10	2×17	12	19,0	34,00

Выполняются регуляторы по схеме с независимым возбуждением от сети напряжением до 220 В и рассчитаны на продолжительный режим работы.

Регулятор РПВ может регулировать ток возбуждения в широких пределах от номинального до нуля, но плавность регулирования ограничена 17 ступенями.

Реостаты возбуждения РШН, РШНД и РШМ предназначены для регулирования напряжения и поддержания постоянства напряжения генераторов и преобразователей и работают в цепях напряжением до 230 В и мощностью до 300 Вт.

Обозначения (РШНД-3): РШ — реостат шунтовой, Н — исполнение нормальное (М — брызгозащищенное), Д — двойной ряд контактов, 3 — габарит.

Реостаты рассчитаны на продолжительный режим работы в закрытых вентилируемых помещениях с температурой окружающей среды 5—35 °С. Охлаждение реостатов — естественное воздушное.

Реостат состоит из коммутирующего устройства и резистора. Резистивные элементы выполнены из круглой константановой проволоки, расположенной на асбестовых трубках. Соединения между трубками и по контактам выполнены медным проводом. Коммутирующее устройство смонтировано на панели, на которой по окружности расположены круглые латунные контакты. Концентрично с ними, ближе к центру, помещено сплошное контактное кольцо из латуни.

Управление реостатом осуществляется вручную при помощи маховичка.

Реостаты серий РШН, РШНД и РШМ включаются в параллельную цепь возбуждения генератора последовательно с обмоткой воз-

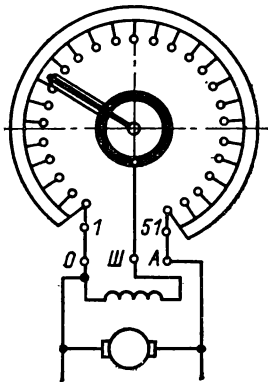


Рис. 21.8. Электрическая схема включения шунтового реостата

буждения. Схема соединения реостатов типов РШНД-2, РШНД-3, РШНД-3Т с генератором приведена на рис. 21.8.

Нагрузочные резисторы и реостаты

Нагрузочные реостаты предназначены для регулирования переменного тока при проверках релейных защит, реле и измерительных приборов на месте их установки, а также для регулирования напряжения,

Реостаты типа РН-5 (ТУ 34.31.15545-79) рассчитаны на напряжение питающей сети переменного тока 127/220 В частотой 50 Гц. Сопротивление одного резистивного элемента составляет $22 \text{ Ом} \pm 20 \%$.

Реостат состоит из тормозного резистора (из 16 резистивных элементов), нагрузочного резистора (из 10 резистивных элементов) и двух регулировочных резисторов.

Наибольший длительно допустимый ток на каждый резистивный элемент нагрузочного и тормозного резисторов реостата составляет 5 А, для регулировочных резисторов — 4 А.

Диапазон регулирования тока при напряжении питания 220 В нагрузочного резистора составляет от 0,45 до 24 А, тормозного — от 0,6 до 38 А.

Для плавного регулирования тока или напряжения в электрических схемах используются реостаты ползункового типа РСР, РСРС и П-90. Реостаты изготавливаются с сопротивлением от 22 до 8600 Ом с продолжительно допустимым током от 14 до 0,25 А.

Изменение сопротивления достигается перемещением ползунка с рукояткой по латунной направляющей квадратного сечения.

Минимальные габариты реостатов $96 \times 64 \times 293$ мм, максимальные $126 \times 86 \times 533$ мм. Масса реостатов изменяется в диапазоне от 1,4 до 4,2 кг. Цена 1 шт. — от 2 руб. 45 коп. до 7 руб.

Спаренные реостаты серии РСРС (ТУ 16.527.197-79) рассчитаны на номинальный ток при их последовательном соединении от 0,25 до 7 А.

Реостаты типа П-90 (ТУ 16.534.021-76Е) предназначены для работы в цепях напряжением до 220 В. Резистивный элемент реостата выполнен из константановой проволоки. Основные технические параметры реостата: сопротивление 90 Ом, мощность 12 Вт, максимально допустимый ток 0,9 А, масса 0,148 кг, цена за 1 шт. 1 руб. 15 коп.

Резисторы непроволочные углеродистые серий ВС и ВСа по ГОСТ 6562-75 предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока в непрерывных и импульсных режимах устройств общего назначения.

Номинальные сопротивления резисторов удовлетворяют ГОСТ 2825-67. Некоторые технические параметры резисторов типа ВС даны в табл. 21.16.

Реостаты серии Р предназначены для регулирования пускового тока электродвигателей, для подзарядки аккумуляторных бата-

Таблица 21.16. Непроволочные резисторы ВС

Тип	Номинальная мощность рассеяния, Вт (по ГОСТ 9663-75)	Конструктивное исполнение
ВС-1 ВС-2	1 2	Стержневые с радиальными ленточными выводами
ВС-5 ВС-10	5 10	Трубчатые с радиальными пластинчатыми выводами

Т а б л и ц а 21.17. Реостаты Р

Тип	Мощность, кВт	Ток, А	Сопротивление, Ом	Масса, кг
P-0,5	0,6	1,1—27,5	500—0,8	3,7
P-1	1,2	1,1—27,5	1000—1,6	11,8
P-1A	1,2	1,1—27,5	1000—1,6	6,2
P-2	1,8	1,9—38	500—1,25	19,2
P-3	2,4	2,7—38	335—1,65	23,5
P-4	3,2	3,6—40	250—2,0	26,5

рей и других цепей напряжением до 250 В (табл. 21.17). Цена — от 11 до 36 руб.

Конструктивно они выполнены следующим образом: переключающее устройство, представляющее собой латунные винты с полукруглой головкой, расположено на гетинаксовой панели; через отверстие в центре панели проходит валик, на котором закреплены гетинаксовый рычаг с подвижным мостиковым контактом и пластмассовый маховик для его вращения. К контактным винтам, расположенным с внутренней стороны панели, подсоединены резистивные элементы (пластинчатые или спиральные). Кожух, закрывающий реостат, имеет сплошное металлическое дно с уступами для крепления.

Основы расчета резисторов и реостатов

Расчет и проектирование резисторов и реостатов для работы в цепях электродвигателей включают следующие основные этапы: расчет числа ступеней резисторов, их сопротивлений, габаритных размеров и токовых нагрузок, выбор типа резистивного элемента, тепловой расчет резисторов.

Рассмотрим методику расчета на примере пусковых и тормозных резисторов. Схема включения пускотормозных резисторов приведена на рис. 21.9.

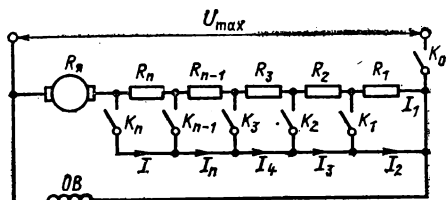


Рис. 21.9. Схема включения пускотормозных резисторов

Максимально допустимый пусковой ток из условий коммутации

$$I_{max} = (2 \div 2,5) I_{ном},$$

где $I_{ном}$ — номинальный ток.

Минимально возможный пусковой ток

$$I_{min} = (1,2 \div 1,5) I_c,$$

где I_c — ток статической нагрузки.

Отношение пусковых токов

$$\alpha = I_{max}/I_{min}.$$

Полное пусковое сопротивление

$$R_0 = U_{max}/I_{max},$$

где U_{max} — наибольшее напряжение на выводах двигателя.

Число пусковых ступеней равно

$$n = \frac{\ln R_0 - \ln R_я}{\ln \alpha},$$

где $R_я$ — сопротивление якоря.

Сопротивление первой ступени (включен контакт K_0)

$$R'_1 = R_0 - R_я.$$

Сопротивление второй ступени (включены контакты K_0 и K_1)

$$R'_2 = R_я (\alpha^{n-1} - 1).$$

Сопротивление предпоследней ступени (включены контакты $K_0, K_1 \dots K_{n-2}$)

$$R'_{n-1} = R_я (\alpha^2 - 1).$$

Сопротивление последней ступени (включены контакты $K_0 \dots K_{n-1}$)

$$R'_n = R_я (\alpha - 1).$$

Соответственно токи первой, второй, третьей, предпоследней и последней ступеней

$$I_1 = U_{max}/R_0;$$

$$I_2 = U_{max}/R_я \alpha^{n-1};$$

$$I_3 = U_{max}/R_я \alpha^{n-2};$$

$$\dots$$

$$I_{n-1} = U_{max}/R_я \alpha^2;$$

$$I_n = U_{max}/R_я \alpha.$$

Ток двигателя при введенном пусковом реостате

$$I = U_{max}/R_я.$$

Первый этап расчета включает определение габаритных размеров и допустимых отклонений сопротивлений ступеней.

Согласно существующим стандартам на жаропрочные высокоомные материалы и резистивные элементы, выпускаемые промышленностью, допускаются обусловленные технологией изготовления отклонения сопротивления, в пределах 5—20 % номинального значения. В то же время по существующим нормам допустимые отклонения на сопротивления готовых резисторов и реостатов колеблются в пределах 2—10 %. При проектировании это необходимо учесть. Расчет проводится в следующей последовательности.

1. Определяется допустимое отклонение сопротивления отдельных ступеней резистора:

$$R_{max} = R_{ном} + \Delta R.$$

2. Находятся отклонения сопротивления одного витка:

для материалов прямоугольной формы ($a \times b$)

$$r_{max} = \rho_{max} l_{max} / a_{min} b_{min};$$

$$r_{min} = \rho_{min} l_{min} / a_{max} b_{max};$$

для круглого материала (D)

$$r_{max} = 1,27 \rho_{max} l_{max} / D_{min}^2;$$

$$r_{min} = 1,27 \rho_{min} l_{min} / D_{max}^2.$$

3. По отклонениям сопротивлений ступеней и витка рассчитываются максимальное и минимальное числа витков;

$$\omega_{max} = R_{max} / r_{min}; \quad \omega_{min} = R_{min} / r_{max}.$$

4. Определяется минимально допустимое расчетное число витков, удовлетворяющее возможным отклонениям сопротивления ступени резистора по нижнему пределу;

$$\omega_p = R_{min} / r_{min}.$$

Габаритные размеры резисторов вытекают из расчетного числа витков, найденных по минимально допустимому сопротивлению ступени и минимально возможному сопротивлению одного витка.

Тип резистивного элемента выбирается из рассмотренных выше разновидностей резисторов и реостатов с учетом типа и мощности двигателей, для управления которых они применяются. Учитываются также допустимая мощность резистивных элементов, потери давления в элементах от расхода воздуха при принудительной вентиляции, удобство подбора сопротивлений по ступеням и более полная загрузка резисторов по мощности, возможность взаимозаменяемости резисторов и т. д.

Выборный тип резистивного элемента резистора проверяется по превышению температуры, которое не должно быть выше допустимого значения для изоляции, с которой соприкасается резистивный элемент.

При тепловом расчете резисторов и реостатов принимаются следующие основные допущения:

а) теплопроводность материала проводника в радиальном направлении бесконечно велика, и поэтому он имеет одинаковую температуру по сечению;

б) проводник принимается бесконечно длинным, т. е. температура по его длине одинакова и теплопередача в осевом направлении отсутствует;

в) теплофизические коэффициенты, определяющие условия теплообмена, не зависят от температуры;

г) теплопередача с поверхности проводника всюду одинакова;

д) теплообмен на границе проводника с окружающей средой описывается законом Ньютона.

Превышение температуры проводника при равномерном во времени нагревании

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-t/\theta_T}) + \tau_0 e^{-t/\theta_T},$$

где τ , τ_0 , τ_y — превышения температуры тела над окружающей средой соответственно через время t после начала нагрева, в начале нагрева и установившееся; θ_T — постоянная времени нагрева.

Превышение температуры

$$\tau_y = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha_c T)}{k_T p S - I^2 \rho_0 \alpha_c},$$

где I — установившийся ток в проводнике; ρ_0 — удельное сопротивление проводника при 0°C ; α_c — температурный коэффициент сопротивления; p — периметр поперечного сечения

Таблица 21.18. Коэффициенты теплопередачи

Резистивные элементы	k_T , Вт/(м ² ·°C)	Охлаждающая поверхность	Вид охлаждения	Примечание
Бескаркасные, выполненные из константановой проволоки или ленты, помещенные в закрытый железный кожух, плохо проницаемый для воздуха	16,8	Общая поверхность проволоки или ленты	Естественный	—
То же	61,6	То же	Искусственный	Скорость воздуха 2,5 м/с
Витые круглые проволочные с обмоткой из константановой или хромоникелевой проволоки	16,8—21	Наружная поверхность цилиндра	Естественный	Цилиндр фарфоровый
То же	67	То же	Искусственный	Скорость воздуха 2,5 м/с
Витые круглые ленточные из никелина	18,2	Наружная поверхность цилиндра	Естественный	—
То же	76,7	То же	Искусственный	Скорость воздуха 2,5 м/с
Литые плоские	7,4	Общая поверхность резистора	Естественный	—
То же	19	То же	Искусственный	Скорость воздуха 2,5 м/с
Витые овальные с обмоткой из константановой или хромоникелевой проволоки или ленты	10—14	Общая поверхность проволоки или ленты	Естественный	—
Чугунные	10—13	Общая поверхность элемента	»	—
Трубчатые эмалированные резисторы вертикальные	21	Наружная поверхность трубки	»	—
Рамочные резистивные элементы с намоткой из константановой, хромоникелевой проволоки или ленты	10—11	Полная поверхность проволоки или ленты	»	—

проводника; S — площадь поперечного сечения проводника; k_T — коэффициент теплопередачи; T — температура проводника.

Постоянная времени

$$\vartheta_T = \frac{S^2 \gamma c}{k_T \rho S - I^2 \rho_0 \alpha_c},$$

где γ — плотность материала проводника; c — удельная теплоемкость материала проводника.

Обычно постоянная времени нагрева стандартных резисторов и реостатов, выпускаемых промышленностью, определяется экспериментально.

Для процесса охлаждения проводника справедливо уравнение

$$\tau = \tau_y e^{-t/\vartheta_T}.$$

При практических расчетах резисторов и реостатов можно использовать приведенные выше зависимости, преобразовав их с учетом реальных конструкций и условий теплопередачи.

Большую трудность представляет выбор коэффициента теплопередачи k_T . В табл. 21.18 приведены значения k_T для некоторых типов резистивных элементов и условий их работы.

В реальных условиях резисторы и реостаты могут работать также в кратковременном, повторно-кратковременном и перемежающемся режимах. При этом пользуются понятием эквивалентных по превышению температуры продолжительных токов. Это неизменный ток, который вызовет установившееся превышение температуры резистора, равное максимальному превышению температуры от действия изменяющегося тока в данном промежутке времени. Существуют расчетные и эмпирические зависимости для определения эквивалентных токов в резисторах.

21.2. КОНДЕНСАТОРЫ

Общие сведения о силовых конденсаторах

Силовые конденсаторы применяются в силовых сетях высокого и низкого напряжения или в силовых устройствах повышенных частот. Они могут применяться как отдельными единицами, так и в виде комплектов конденсаторных установок или мощных батарей с параллельно-последовательным соединением отдельных единиц. В отличие от конденсаторов, применяемых в радиоэлектронике, силовые конденсаторы за исключением нескольких типов имеют значительные объем и массу, а также большие емкость, реактивную мощность и запасаемую энергию в единице.

Силовые конденсаторы обычно классифицируются в соответствии с областями их применения, режимами работы и конструктивными особенностями по следующим основным группам:

а) конденсаторы для компенсации реактивной мощности в электроустановках переменного тока промышленной частоты (косинусные и др.);

б) конденсаторы для компенсации реактивной мощности в электроустановках переменного тока повышенной (от 500 до 10 000 Гц) и

высокой (свыше 10 кГц) частоты (установки для индукционного нагрева, ультразвуковые установки и др.);

в) конденсаторы связи и отбора мощности;

г) конденсаторы, работающие на постоянном токе с наложением переменной составляющей (фильтровые и др.);

д) конденсаторы, работающие в режиме заряд — разряд (импульсные, накопительные);

е) конденсаторы, используемые для коммутации вентилей в преобразовательных установках;

ж) демпфирующие конденсаторы, служащие для ограничения импульсных перенапряжений в распределительных сетях, выключателях, преобразовательных установках.

В силовом конденсаторостроении наблюдается большое разнообразие конструктивных исполнений. Наряду с этим силовые конденсаторы имеют некоторые общие черты.

В качестве твердого компонента рабочего диэлектрика в силовых конденсаторах применяется, как правило, конденсаторная бумага, пропитанная жидкими диэлектриками. Достоинство бумаги — высокие диэлектрические параметры и хорошие физико-механические свойства. Отечественной промышленностью наряду с бумагой среднего качества плотностью $(1 \div 1,25) \times 10^3$ кг/м³ (марки КОН по ГОСТ 16745-83 и ГОСТ 16746-83) освоено производство бумаги малой плотности $(0,7 \div 1,0) \cdot 10^3$ кг/м³ (марки силкон по ГОСТ 16745-83). Для силовых конденсаторов с пропиткой хлорированными жидкостями выпускается оксидная конденсаторная бумага, содержащая окись алюминия (Al_2O_3) или другие сорбенты.

Из синтетических полимерных пленок и бумажно-пленочных диэлектриков в настоящее время наибольшее распространение в силовом конденсаторостроении получили: полистирольная пленка в сочетании с нефтяным маслом (в конденсаторах повышенной частоты), полипропиленовая изотактическая пленка в сочетании с хлордифенилами и ароматизированными маслами плотностью около 900 кг/м³, полипропиленовая пленка в комбинации с конденсаторной бумагой и хлорированным дифенилом (в конденсаторах переменного тока промышленной частоты). Синтетические полимерные пленки и бумажно-пленочные диэлектрики отличаются более высокой электрической прочностью, низким тангенсом угла потерь и высокой напряженностью возникновения частичных разрядов.

Для силовых конденсаторов в качестве пропитывающего диэлектрика применяются:

1) газостойкое конденсаторное масло фенольной селективной очистки из сернистых нефтей с антиокислительной присадкой (№ 2 по ГОСТ 5775-83);

2) синтетическая электроизоляционная жидкость на основе хлордифенила: пентахлордифенил (ОСТ 6.01.43-79), температура застывания составляет 6—10 °С, при низких температурах (—10 °С) наблюдается резкое снижение надежности и срока службы конденсаторов; трихлордифенил (ОСТ 6.01.43-79), температура застывания —18 °С; нижний предел рабочей температуры составляет —35 °С; синтетическая жидкость, состоящая из различных хлорпроизводных дифенила типов МГ, МГТ и КЖ;

3) касторовое масло техническое и медицинское (для высоковольтных импульсных конденсаторов);

4) синтетические электроизоляционные жидкости на основе кремнийорганических (полиорганосилоксановых) соединений. Применяются в конденсаторах с расширенным диапазоном рабочих температур (например, ФС-5 имеет температуру застывания -100°C).

В качестве обкладок конденсаторов применяется алюминиевая фольга (ГОСТ 618-73) толщиной $0,007 \pm 0,001$ мм.

В основе силового конденсатора лежат спирально намотанные плоскопрессованные секции, из которых набирается пакет. В зависимости от типа конденсатора секции в пакете образуют параллельное, последовательное или смешанное соединение.

Секции, из которых набираются пакеты, состоят из двух тонких лент алюминиевой фольги (обкладок), разделенных несколькими листами конденсаторной бумаги. Намотка секций выполняется на специальных станках со скрытой (рис. 21.10, а) или выступающей (рис. 21.10, б) фольгой. Секции с выступающей фольгой используются для улучшения теплоотвода из наиболее нагретых внутренних областей конденсатора. При параллельном соединении секций каждая из них обычно снабжается плавким предохранителем в виде медной проволоки диаметром $0,25-0,35$ мм, отключающим секцию в случае ее пробоя. Конструктивно секция может быть выполнена из нескольких подсекций, соединенных последовательно, например секция, рассчитанная на двойное напряжение (рис. 21.10, в). Одна обкладка является общей для обеих подсекций и наматывается скрыто. Имеются еще две электрически не соединенные между собой обкладки с выступающими краями.

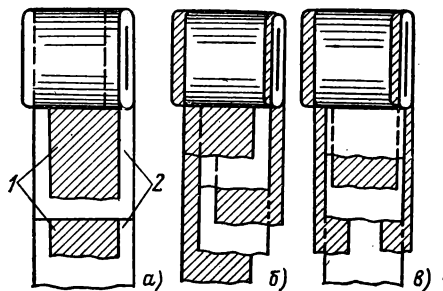


Рис. 21.10. Конструкция секций конденсаторов:

а — со скрытой фольгой (1 — обкладка; 2 — диэлектрик); б — с выступающей фольгой; в — с двумя подсекциями

Секция наматывается на цилиндрическую или плоскую оправку, после чего прессуется. При намотке секций с выступающей фольгой ленты фольги с каждого торца секции выступают на $2,5$ мм от краев бумаги, благодаря чему осуществляется токоподвод.

В секциях со скрытой фольгой предусмотрены на каждую ленту фольги токоподводы (вкладыши), выполненные из медной луженой фольги толщиной $0,05$ мм.

Пакет, состоящий из набора секций, помещается в прямоугольный или цилиндрический

корпус из листового металла (стали, латуни, алюминия) или изоляционного материала (бакелизированной бумаги, фарфора, пластмассы). Металлические корпуса применяются для силовых конденсаторов со значительным тепловыделением, изоляционные корпуса — для конденсаторов на высокие напряжения, в которых тепловыделение невелико.

Сборка конденсаторов в металлических корпусах производится до пропитки пакетов, а конденсаторов в изоляционных корпусах — после вакуумной сушки и пропитки. Вакуумная сушка и пропитка (до 150°C) предназначены для удаления из бумаги воздуха и частиц влаги и заполнения конденсатора электроизоляционной жидкостью для обеспечения требуемых электрических и тепловых характеристик.

Готовые конденсаторы подвергаются контрольным и типовым испытаниям, куда входят: испытания на герметичность, электрические испытания (измерение емкости, испытание напряжением, повторное измерение емкости, измерение тангенса угла потерь и т. д.), проверка термической стабильности, влагостойкости, механические испытания и др. Для маркировки конденсаторов применяют таблички, на которых указывают завод-изготовитель, тип конденсатора и его заводской номер, рабочее и испытательное напряжения, номинальные емкость и мощность, частоту тока, схему соединения, год выпуска и номер ГОСТ или ТУ.

К конструкции конденсаторов и конденсаторных установок предъявляется ряд требований безопасности, изложенных в [21.21]. В частности, каждый конденсатор должен иметь разрядный резистор, который в конденсаторах для повышения коэффициента мощности и для продольной компенсации должен обеспечивать снижение напряжения до 50 В за 1 мин для конденсаторов на 660 В и ниже и за 5 мин для конденсаторов на напряжение свыше 660 В.

Конденсаторы для электроустановок переменного тока промышленной частоты

К данной группе конденсаторов относятся в первую очередь конденсаторы для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока частотой 50 Гц (или косинусные), выпускаемые согласно ГОСТ 1282-79. В соответствии с этим ГОСТ конденсаторы выпускаются для внутренних и наружных установок с расчетом на продолжительную работу при температуре окружающего воздуха не более 50°C . На номинальные напряжения $1,05$; $3,15$; $6,3$; $10,5$ кВ конденсаторы изготавливаются в однофазном исполнении, на номинальные напряжения $0,22$; $0,38$; $0,5$ и $0,66$ кВ — как в однофазном, так и в трехфазном исполнении. Конденсаторы однофазного исполнения изготавливаются как с двумя изолированными выводами, так и с выводами, один из которых соединен с корпусом. В трехфазных конденсаторах секции в пакете делят на три группы (фазы) и соединяют по схеме треугольника. В конденсаторах на номинальное напряжение $1,05$ кВ и ниже все секции соединены параллельно и каждая снабжена встроенным внутри плавким предохранителем, который отключает

секцию при ее пробое. В конденсаторах на номинальные напряжения 3,15; 6,3 и 10,5 кВ соединение секций в пакетах конденсаторов смешанное.

Допускается изготовление единичных конденсаторов в трех габаритах корпусов: нулевой габарит — в корпусе размерами $380 \times 120 \times 180$ мм; первый габарит — в корпусе размерами $380 \times 120 \times 325$ мм; второй габарит — в корпусе размерами $380 \times 120 \times 640$ мм, где первое число указывает длину, второе — ширину и третье высоту.

Конструктивное исполнение косинусных конденсаторов обозначается цифрами: 1 — однофазное исполнение с одним изолированным выводом; 2 — однофазное исполнение с двумя изолированными выводами и 3 — трехфазное исполнение.

Изготавливаются конденсаторы с пропиткой синтетическими жидкостями трех серий: II, III и IV.

Конденсаторы II и III серий рассчитаны на срок службы 20 лет, а IV серии — 15 лет.

В настоящее время предусмотрено изготовление следующих типов конденсаторов для повышения коэффициента мощности: КСО, КС1, КС2 исполнения У, категорий 1 и 3, по ГОСТ 16350-80. В обозначении типа конденсатора буквы и цифры означают: К — косинусный; С — пропитка синтетическими жидкостями; 0, 1, 2 — исполнения в корпусах нулевого, первого и второго габаритов. Например, КС1-6,3-37,5-2У3 ГОСТ 1282-79 — конденсатор косинусный, с пропиткой синтетическими жидкостями, изготовленный в корпусе первого габарита на напряжение 6,3 кВ, мощность 37,5 квар, однофазный с двумя изолированными выводами, исполнения У, для категории 3, по ГОСТ 1282-79.

Масса конденсаторов нулевого габарита не превышает 18 кг, 1-го — 30 кг, 2-го — 60 кг. Отклонение емкости (мощности) конденсатора от номинальной при 20 °С составляет не более: $\pm 10\%$ для конденсаторов мощностью менее 10 квар в единице; $-5, \pm 10\%$ для конденсаторов мощностью 10 квар и выше в единице.

Конденсаторы могут изготавливаться как со встроенными разрядными резисторами, так и без них (оговаривается при заказе).

На конденсаторе, имеющем выводы, один из которых соединен с корпусом, болты для заземления не устанавливаются.

Выемная часть конденсаторов состоит из одного пакета в конденсаторах 1-го и нулевого габаритов и одного или двух пакетов в конденсаторах 2-го габарита.

Основные технические данные конденсаторов типа КС приведены в табл. 21.19 (номинальное напряжение и мощность входят в обозначение типа).

Допускается длительная работа конденсаторов при действующем значении напряжения до 110 % номинального и действующем значении тока до 130 % номинального. Мощность конденсатора при их эксплуатации не должна превышать 1,33 номинальной.

Конденсаторы изготавливаются в сварных корпусах из листовой стали, с фарфоровыми изоляторами. На корпусе имеется болт для защитного заземления и скобы для перемеще-

Таблица 21.19. Косинусные конденсаторы КС

Тип	Номинальная емкость, мкФ	Высота конденсатора, мм	Масса, кг	Цена, руб/квар
КС1-0,23-6,5-3У3	397	325	30	17,85
КС2-0,23-13-3У3	794	640	60	15,85
КС2-0,23-18-3У3	1100	640	60	14,2
КС1-0,38-18-3У3	397	325	30	5,65
КС2-0,38-36-3У3	794	640	60	5,25
КС2-0,38-50-3У3	1102	640	60	5,25
КС1-0,5-18-3У3	230	325	30	5,2
КС2-0,5-36-3У3	460	640	60	4,8
КС1-0,66-20-3У3	146	325	30	5,2
КС1-0,66-25-3У3	183	325	30	5,2
КС2-0,66-40-3У3	292	640	60	4,65
КС2-0,66-50-3У3	366	640	60	4,65
КС1-1,05-37,5-2У3	108,3	325	30	3,35
КС2-1,05-75-2У3	217	640	60	3,05
КС1-3,15-37,5-2У3	8	325	30	3,35
КС2-3,15-75-2У3	16	640	60	3,05
КС1-6,3-37,5-2У3	2,0	325	30	3,35
КС2-6,3-75-2У3	6,0	640	60	3,05
КС2-6,3-100-2У3	8,03	640	60	3,05
КС1-10,5-37,5-2У3	1,08	325	30	3,35
КС2-10,5-75-2У3	2,16	640	60	3,05
КС2-10,5-100-2У3	2,9	640	60	3,05

Примечания: 1. Оптовые цены, утвержденные на конденсаторы типов КС1 и КС2 на номинальные напряжения до 1,05 кВ в конструктивном исполнении 3 (трехфазное исполнение), распространяются на аналогичные по техническим параметрам конденсаторы в конструктивном исполнении 1 и 2 (однофазное с одним и двумя изолированными выводами).

2. Оптовые цены на конденсаторы типов КС1 и КС2 на номинальные напряжения 1,05 и выше в конструктивном исполнении 2 распространяются на аналогичные по техническим параметрам конденсаторы в конструктивном исполнении 1.

ния конденсатора. Рабочее положение вертикальное, выводами вверх (рис. 21.11).

На базе косинусных конденсаторов типа КС изготавливаются комплектные установки (ККУ), которые в настоящее время находят все более

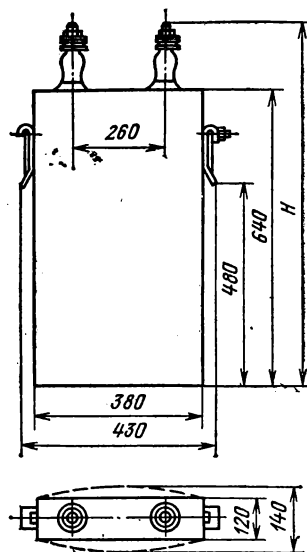


Рис. 21.11. Конденсатор типа КС

Таблица 21.20. Комплексные конденсаторные установки

Тип	Номинальная мощность, квар	Исполнение	Габаритные размеры, мм			Масса, кг	Цена, руб.
			Основание		Высо- та		
			Длина	Шири- на			
УК-0,38-75У3 УК-0,38-150У3	75 150	Внутреннее	700 700	560 560	1260 1660	150 245	575 890
УКБ-0,38-150У3 УКБ-0,38-300У3	150 300	Внутреннее	580 580	460 460	1200 1990	200 440	935 1785
УК2-0,38-50У3 УКБН-0,38-150У3	50 150	Внутреннее	375 630	430 520	650 1400	72 290	335 1300
УК-6,3-450П(Л)У3 УК-10,5-450П(Л)У3 УК-6,3-900П(Л)У3 УК-10,5-900П(Л)У3 УК-6,3-1125П(Л)У3 УК-10,5-1125П(Л)У3	450 450 900 900 1125 1125	Внутреннее	2140 2140 3540 3540 4240 4240	880 880 880 880 880 880	1800 1800 1800 1800 1800 1800	670 670 1160 1160 1405 1405	1820 1820 3355 3355 4240 4240
УКЛ(П)Н-0,38-150-50У3	150	Внутреннее с блоком автоматического регулирования	1220	560	1660	335	1515

широкое применение ввиду их высокой экономичности. Конденсаторные установки предназначены для компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения в распределительных сетях и электроустановках. В настоящее время изготавливаются ККУ на напряжения 0,38; 6,3 и 10,5 кВ (табл. 21.20 — напряжение входит в обозначение типа).

Допустимое отклонение по емкости в ККУ составляет от -5 до $+15$ %.

В последнее время широко используется в распределительных сетях 3—35 кВ и линиях электропередачи 110—500 кВ продольная емкостная компенсация реактивного сопротивления на базе силовых конденсаторов типа КСП.

К данной группе конденсаторов относится конденсатор типа КСП-0,66-40У1 (ТУ 16.527.228-82Е), косинусный, с пропиткой синтетической жидкостью, для установок продольной компенсации, на номинальное напряжение 0,66 кВ, номинальную мощность 40 квар, по исполнению и категории У1, массой 55 ± 5 кг.

Отклонение емкости (мощности) конденсатора от номинальной при 20°C не должно превышать ± 10 %. Тангенс угла потерь конденсатора не превышает 0,0035 (при 90°C).

Разрядные резисторы, встроенные в конденсатор, снижают после отключения конденсатора амплитудное значение напряжения до 50 В за время не более 1 мин.

В условиях климатического исполнения У по категории 1 применяются конденсаторы для установок продольной компенсации КСП-1,05-75У1 (ТУ 16.527.228-82Е) и КСП-0,66-36Т1 (ТУ 16.527.228-82Е).

Конденсаторы КСЭ предназначены для работы в батареях индукционных печей или других электротермических установок частоты 50 Гц, с напряжением 1,05; 2,1 и 3,15 кВ. Тангенс угла потерь не превышает 0,0025 (при 90°C).

Конденсаторы для люминесцентных ламп

(ТУ 16.527.167-80Е) предназначены для повышения коэффициента мощности пускорегулирующих аппаратов люминесцентных ламп. Работают при температуре от -30 до $+50^\circ\text{C}$ с отклонением по емкости от номинальной до ± 5 % (при 20°C). Выпускаются следующие типы конденсаторов на номинальные напряжения 0,4 и 0,25 кВ: ЛСМ400-1У1,1; ЛСМ400-3У1,1; ЛСМ400-3,8У1,1; ЛСМ400-7,8У1,1 и ЛСМ250-4,5У1,1 стоимостью 0,78; 1,23; 1,34; 2,08 и 1,24 руб. соответственно.

Конденсаторы повышенной частоты

К данной группе конденсаторов в первую очередь относятся конденсаторы для повышения $\cos \varphi$ электротермических установок на частоты 0,5—10 кГц с водяным охлаждением (по ГОСТ 18689-81). Основное место среди них занимают конденсаторы типа ЭСВ (рис. 21.12), например ЭСВ-0,8-0,5-2У3 — конденсатор для электротермических установок, с пропиткой синтетической жидкостью и с водяным охлаждением основной (П — подстроечный), на напряжение 0,8 кВ, частоты 0,5 кГц, с двумя выводами, климатическое исполнение У, категории размещения 3.

Рабочие напряженности поля в диэлектрике составляют 15,5—16 МВ/м при номинальной частоте 0,5 кГц, около 12,5 МВ/м при 1 кГц, 8—9 МВ/м при 2,4 кГц, 7—7,5 МВ/м при 4 кГц, 4,5—5 МВ/м при 10 кГц.

Пакет конденсатора собирается из отдельных секций, соединенных между собой параллельно. Обкладки секций выполнены с выступающей фольгой (для улучшения теплоотвода). Для снижения потерь фольга обкладок берется большей толщины (0,016 мм), чем у конденсаторов других типов.

С одной стороны пакета к обкладкам припаявается охлаждающий змеевик из медной трубки диаметром 10/7 мм, по которому во вре-

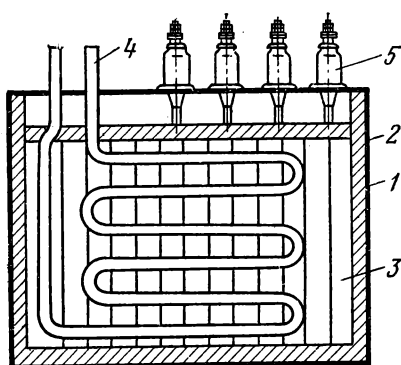


Рис. 21.12. Конструкция конденсатора серии ЭСВ:

1 — корпус; 2 — изоляция пакета от корпуса; 3 — секция; 4 — охлаждающая трубка; 5 — проходной изолятор

ма работы конденсатора пропускается охлаждающая вода. Концы охлаждающего змеевика выступают над крышкой корпуса и припаиваются к общему выводу *О*. Охлаждающий змеевик используется и в качестве токоподвода. Другие обкладки секций с противоположной стороны пакета изолированы от корпуса и подсоединены к токоподводам. Параллельно соединенные секции образуют ступени с самостоятельными выводами через фарфоровые изоляторы на крышку корпуса. Такая разбивка секций на ступени вызвана большими токами, протекающими через выводы конденсатора.

Основные конденсаторы ЭСВ (постоянная емкость контура) имеют две или четыре ступени емкости, подстроечные ЭСВП (регулируемая емкость контура) — пять ступеней и выводов. Пакеты помещены в сварной корпус прямоугольной формы, выполненный из стали для конденсаторов, работающих при частоте до 1 кГц, и из латуни или немагнитной стали для конденсаторов, работающих при частоте выше 1 кГц.

Нормальная работа конденсаторов обеспечивается в закрытых электропомещениях на высоте не более 1000 м над уровнем моря, при температуре окружающего воздуха 5—35 °С, относительной влажности 80 %, во взрывобезопасной среде, рабочее положение — вертикальное выводами вверх. Тангенс угла потерь при частоте 50 Гц и температуре 25 °С не превышает 0,004 для конденсаторов мощностью до 220 квар и 0,0035 для конденсаторов мощностью выше 220 квар. Допустимые отклонения емкости (мощности) конденсаторов от номинальной при 25 °С составляют: —10 до +20 % — до 270 квар, ± 10 % — для 300 квар. В конденсаторах предусмотрено искусственное водяное охлаждение с максимально допустимым давлением охлаждающей воды на входе не более 0,6 МПа.

Конденсаторы типа ЭСВ и ЭСВП на номинальные напряжения 0,5; 0,8; 1,0; 1,6; 2,0 кВ, частотой до 10,0 кГц и мощностью до 400 квар выпускаются по ГОСТ 18689-81.

Конденсаторы испытываются постоянным 4,5—8-кратным напряжением по сравнению с номинальным.

Основные технические параметры конденсаторов типа ЭСВ приведены в табл. 21.21, схемы включения конденсаторов на номинальные напряжения — в табл. 21.22.

Конденсаторы для емкостной связи, отбора мощности и измерения напряжения

Конденсаторы в фарфоровых корпусах с диэлектриком из конденсаторной бумаги, пропитанной минеральным маслом, классов напряжения от 35 до 500 кВ включительно согласно ГОСТ 15581-80 предназначены для обеспечения емкостной связи по ЛЭП переменного тока частотой 50 Гц и для телемеханики и защиты. Конденсаторы класса напряжения 500 кВ предназначены также для измерения напряжения и для отбора мощности с целью обеспечения электроэнергией переключающих пунктов, расположенных вдоль ЛЭП высокого напряжения.

Таблица 21.21. Конденсаторы ЭСВ

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Частота, кГц	Номинальная мощность, квар	Номинальная емкость, мкФ	Масса, кг	Цена, коп/квар
ЭСВ0,8-0,5-2У3	0,8	0,5	200	99,5	35	48
ЭСВ1,0-0,5-2У3	1,0	0,5	200	63,6	35	48
ЭСВ1,6-0,5-2У3	1,6	0,5	200	24,9	35	48
ЭСВ2,0-0,5-2У3	2,0	0,5	200	15,91	35	48
ЭСВ0,8-1-2У3	0,8	1,0	250	62,2	35	39
ЭСВ1,0-1-2У3	1,0	1,0	250	39,8	35	39
ЭСВ1,6-1-2У3	1,6	1,0	250	15,55	35	39
ЭСВ2,0-1-2У3	2,0	1,0	250	9,95	35	39
ЭСВ0,5-2,4-4У3	0,5	2,4	300	79,6	35	35
ЭСВ0,8-2,4-2У3	0,8	2,4	300	31,2	35	35
ЭСВП0,8-2,4-У3	0,8	2,4	300	31,2	35	36
ЭСВ1,0-2,4-2У3	1,0	2,4	300	19,9	35	35
ЭСВП1,0-2,4-У3	1,0	2,4	300	19,9	35	36
ЭСВ1,6-2,4-2У3	1,6	2,4	300	7,8	35	35
ЭСВ2,0-2,4-2У3	2,0	2,4	300	4,97	35	35
ЭСВ0,5-2,4-4У3	0,5	2,4	300	79,6	35	35
ЭСВ1,0-4-2У3	1,0	4,0	350	13,9	35	33
ЭСВ0,5-4-2У3	0,5	4,0	350	55,7	35	33
ЭСВ0,8-4-2У3	0,8	4,0	350	21,8	35	33
ЭСВП0,8-4-У3	0,8	4,0	350	21,8	35	34
ЭСВП1,0-4-У3	1,0	4,0	350	13,9	35	34
ЭСВ1,6-4-2У3	1,6	4,0	350	5,45	35	33
ЭСВ2,0-4-2У3	2,0	4,0	350	3,48	35	33
ЭСВ0,8-10-У3	0,8	10,0	400	9,96	35	27
ЭСВ0,5-10-4У3	0,5	10,0	400	25,5	35	26

Таблица 21.22. Основные схемы включения конденсаторов ЭСВ на номинальные напряжения

Место	Схемы включения	Точки приложения рабочего напряжения	Емкость
1		0-1, 2, 3, 4	$C = 4C_{гр}$
2		0-1, 2	$C = 2C_{гр}$
3		1, 2-3, 4	$C = C_{гр}$
4		1-2	$C = C_{гр}/2$
5		0-1, 2, 3, 4 0-1 0-2 0-3 0-4	$C = C_{гр1} + C_{гр2} + C_{гр3} + C_{гр4}$ $C_{гр1} = \frac{9}{16}C$ $C_{гр2} = \frac{4}{16}C$ $C_{гр3} = \frac{2}{16}C$ $C_{гр4} = \frac{1}{16}C$

Пример обозначения: СМБ-110/ $\sqrt{3}$ -0,0064У1 — конденсатор связи с пропиткой минеральным маслом, с расширителем, с длинной пути утечки внешней изоляции категории Б (по ГОСТ 9920-75), для измерительных конденсаторов добавляется буква Й, на напряжение 110/ $\sqrt{3}$ кВ, емкостью 0,0064 мкФ, условия исполнения У, категории 1 (по ГОСТ 16350-80).

Конденсаторы для отбора мощности, с пропиткой минеральным маслом, на напряжение 15 кВ, емкостью 0,107 мкФ обозначаются ОМ-15-0,107У1.

Конденсаторные блоки для емкостной связи на напряжения 35, 110, 150, 220, 330 и 500 кВ состоят из одного или нескольких конденсаторов связи, соединенных последовательно и установленных на одной изолирующей фарфоровой подставке типа ПИ. В комплект конденсаторов для измерения напряжения и отбора мощности входит один компенсатор отбора мощности.

Изолирующие подставки в зависимости от размеров изготавливаются трех типов: ПИ-1У1, ПИ-11У1, ПИ-111У1. Цена подставок в зависимости от типоразмеров составляет для ПИ-1У1 48 руб., для ПИ-11У1 — 64 руб., для ПИ-111У1 — 230 руб.

Корпус конденсатора фарфоровый с утолщенными торцами для механического крепления крышек. Для уплотнения применяются прокладки из холодоустойчивой резины. Внутренняя часть состоит из одного или нескольких пакетов, соединенных параллельно-последовательно (СМ166/ $\sqrt{3}$) или параллельно (ОМ15). Каждый пакет состоит из большого числа последовательно соединенных секций.

Для создания компенсации давления масла внутри конденсатора при изменении температуры окружающей среды применяют расширители, состоящие из набора мембранных коробок, расположенных над пакетом. Мембранные коробки выполнены из двух стальных тарельчатых мембран, герметично сваренных между собой. В конденсаторах при нормальной работе предусматривается избыточное давление масла, с тем чтобы во всем диапазоне рабочих температур давление в конденсаторах было не ниже атмосферного.

Технические данные конденсаторов типа СМ приведены в табл. 21.23 (рис. 21.13).

Конденсаторы типа СМ и изолирующие подставки предназначены для работы на высоте не более 1000 м над уровнем моря, в условиях наружной и внутренней установки, при температуре окружающего воздуха $\pm 40^\circ\text{C}$. Тангенс угла потерь конденсатора при частоте 50 Гц и температурах 20 и 65°C не должен превышать 0,003. Резонансная частота конденсаторов — не ниже 750 кГц.

Конденсаторы для делителей напряжения по конструкции аналогичны конденсаторам связи. К данной группе конденсаторов относятся конденсаторы серии ДМ, ДМР, ДМРУ,

Таблица 21.23. Конденсаторы связи СМ

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная емкость, мкФ	Габаритные размеры, мм		Масса, кг	Цена, руб.
			Диаметр	Высота		
СМ-66/ $\sqrt{3}$ -0,0044У1	38	0,0044	280	890	68	130
СМП-66/ $\sqrt{3}$ -0,0044У1	38	0,0044	280	1300	106	175
СМ-110/ $\sqrt{3}$ -0,0064У1	64	0,0064	330	1170	140	255
СМП-110/ $\sqrt{3}$ -0,0064У1	64	0,0064	330	1580	190	335
СМ-166/ $\sqrt{3}$ -0,014У1	96	0,014	730	1375	765	815
СМБ-166/ $\sqrt{3}$ -0,014У1	96	0,014	730	1576	818	1028
СМП-166/ $\sqrt{3}$ -0,014У1	96	0,014	730	1800	975	1020
СМ-15-0,107У1	15	0,107	730	455	345	378

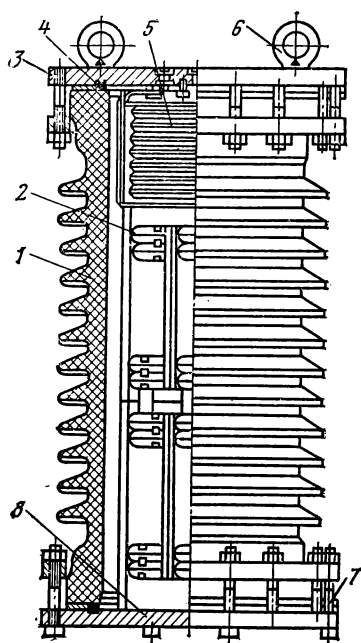


Рис. 21.13. Конденсатор связи типа СМ:

1 — фарфоровая покрывка; 2 — выемная часть; 3 — верхняя крышка; 4 — уплотняющее кольцо; 5 — расширитель; 6 — грузовой винт; 7 — контактный болт; 8 — нижняя крышка

ДМРТС и ДМК. Они предназначены для комплектования измерительных трансформаторов напряжения емкостного типа. Предусмотрено ограничение пределов колебания емкости ($\pm 1,0\%$) при изменении температуры от -50 до $+40^\circ\text{C}$. При частоте 50 Гц тангенс угла потерь отдельных конденсаторов для делителей напряжения не должен быть выше 0,004. Кроме того, это значение не должно превышать при подъеме напряжения до $1,5 U_{\text{ном}}$ и при повышении температуры до 60°C .

Основные технические данные конденсаторов типа ДМ приведены в табл. 21.24.

Фильтровые конденсаторы

Для работы в фильтрах высоковольтных тяговых подстанций применяются силовые конденсаторы типа ФМТ4-5 $\times$ 2 — конденсатор фильтровый, с масляной пропиткой, для тяго-

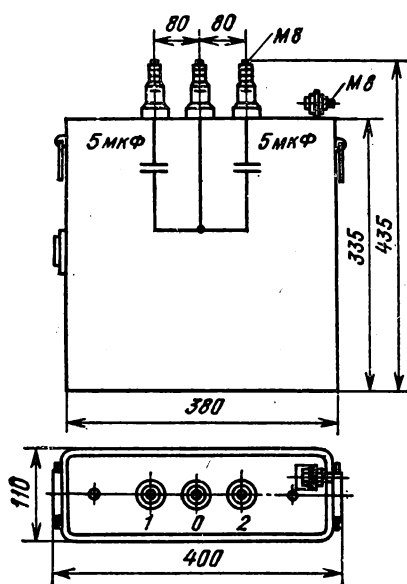


Рис. 21.14. Конденсатор типа ФМТ

вых подстанций, на номинальное напряжение 4 кВ, номинальная емкость 5 $\times$ 2 мкФ.

По конструктивному исполнению (рис. 21.14) конденсаторы ФМТ4-5 $\times$ 2 ничем не отличаются от косинусных конденсаторов. Состоят из двух групп секций емкостью по 5 мкФ с тремя выводными изоляторами (средний — общая точка соединения двух групп секций).

Конденсаторы ФМТ4-5 $\times$ 2 работают при постоянном напряжении с наложением переменной составляющей с частотой от 300 до 1440 Гц при действующем напряжении от 220 до 530 В. Конденсаторы данной группы рассчитаны на длительную работу для внутренней установки, тангенс угла потерь не должен превышать 0,004 (табл. 21.25).

Конденсаторы типа ФМ110-0,0075 нормально работают при температуре окружающей среды от -10 до $+50^\circ\text{C}$ (ТУ 16.521.126-80Е). Состоят из секций и изоляционных планок. Секции скреплены механически при помощи изоляционных планок.

Конденсаторы типа ВМФ устанавливаются в демпфирующих и выравнивающих контурах высоковольтных преобразовательных подстан-

Таблица 21.24. Конденсаторы ДМ

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная емкость, мкФ	Масса, кг	Цена, руб.	ТУ
ДМ-80-0,002У1	80	0,002	100	180	ТУ 16.521.093-79
ДМ-100-2,25УХЛ4	100	2,25	45	270	ТУ 16.521.204-79
ДМ-100-4,5УХЛ4	100	4,5	45	290	ТУ 16.521.204-79
ДМР-80-0,001У1	80	0,001	70	114	ТУ 16.521.067-75
ДМР-80-0,004У1	80	0,004	165	180	ТУ 16.521.067-75
ДМРУ-55-0,0033У1	55	0,0033	70	113	ТУ 16.521.067-75
ДМРУ-60-0,0022У1	60	0,0022	70	108	ТУ 16.521.067-75
ДМРУ-60-0,0025У1	60	0,0025	70	108	ТУ 16.521.067-75
ДМРТС-80-0,001	80	0,001	75	200	ТУ 16.521.248-78
ДМРТС-80-0,004	80	0,004	165	270	ТУ 16.521.248-78
ДМК-190-0,001ХЛ1	190	0,0011	230	370	ТУ 16.521.197-75
ДМК-190-0,0014ХЛ1	190	0,0014	230	480	ТУ 16.521.197-75
ДМК-190-0,0016ХЛ1	190	0,0016	230	480	ТУ 16.521.197-75

Т а б л и ц а 21.25. Фильтровые конденсаторы

Тип	Номи- нальное напря- жение, кВ	Номи- нальная емкость, мкФ	Габаритные размеры, мм			Мас- са, кг	Цена, руб.	ТУ
			Основная		Высо- та			
			длина	шири- на				
ФМТ4-5×2	4	5×2	—	—	—	25	—	—
ФМТ4-12У2	4	12	380	120	425	25	4,3	—
ФСТ-0,75-300У2	0,75	300	380	120	350	33	91	16.527.175-80Е
ФСТ-2,1-160У2	2,1	160	380	120	350	33	117	16.527.185-72
ФСТ-4-40У2	4	40	380	120	350	33	111	16.527.185-72
ФМ-40-68У3	40	68	160	160	358	13	60	16.521.233-77Е
ФМ-63-33У3	63	33	160	160	358	13	60	16.521.233-77Е
ФМ-100-15У3	100	15	160	160	358	13	60	16.521.233-77Е
ФМ-100-22У3	100	22	160	160	358	13	60	16.521.233-77Е
ФМ-110-0,0075	110	0,0075	557	340	515	88	267	16.521.126-80Е
ФК-200-0,015	200	0,015	501	150	352	33	164	16.521.145-72
ВМФ2-105-0,036	54	0,036	—	—	—	950	—	—
ВМФ2-120-0,12	108	0,12	—	—	—	950	—	—
ИМ-40-0,3У3	40	0,3	—	—	—	11	57	16.521.220-76
ИМ-70-0,3У3	70	0,3	—	—	—	13	32	16.521.220-76
ИМ-80+80-0,012+0,012	80+80	0,012+0,012	—	—	—	7	171	16.521.046-80
ИМ-100-0,15У3	100	0,15	—	—	—	32	100	16.521.220-76Е

ций. Они предназначены для сглаживания кривой выпрямленного напряжения, отфильтровывания высших гармоник и демпфирования переходных процессов. Рассчитаны для работы при одновременном приложении постоянного высокого и переменного несинусоидального напряжения.

Конденсаторы типа ВМФ выпускаются в фарфоровых корпусах, по габаритам и конструкции практически не отличаются от конденсаторов связи типа СМ.

Пример обозначения: ВМФ2-105-0,036 — конденсатор выравнивающий, демпфирующий, для выпрямительных и инверторных схем, с масляной пропиткой, в фарфоровом корпусе, сумма постоянной составляющей и действующего значения переменной составляющей напряжения 105 кВ, емкость 0,036 мкФ.

В фильтровом режиме допускается работа и некоторых импульсных конденсаторов серии ИМ. Конденсаторы изготавливаются в бакелитовых цилиндрах на напряжение от 40 до 100 кВ. Они рассчитаны на работу в закрытых помещениях при относительной влажности не более 70 %.

Основные технические данные конденсаторов, предназначенных для работы в фильтровом режиме, приведены в табл. 21.25. Корпус выполнен в виде бумажно-бакелитового цилиндра, алюминиевые крышки являются одновременно и выводами. В качестве уплотнителя используется маслостойкая резина.

Напряженность электрического поля в диэлектрике фильтровых конденсаторов лежит в пределах от 15—20 до 35—40 МВ/м и зависит от соотношения переменной и постоянной составляющих.

Импульсные конденсаторы

Импульсные конденсаторы широко используются в установках для высоковольтных импульсных испытаний, в электротехнологических установках (магнитная штамповка, дробление

пород, сейсмическая разведка и др.). Емкостные накопители энергии на основе импульсных конденсаторов применяются в электрофизических установках: для получения и исследования высокотемпературной плазмы, для создания сверхсильных импульсных токов и т. д. Импульсные конденсаторы используются в устройствах питания мощных импульсных источников света, в медицине, в лазерной и локационной технике.

Импульсные конденсаторы работают в режиме медленный заряд—быстрый разряд, что и определяет электрические и конструктивные особенности данной группы конденсаторов.

Основные технические данные отечественных импульсных конденсаторов приведены в табл. 21.26.

В силовых импульсных конденсаторах высокого напряжения между обкладками фольги применяются в основном конденсаторная бумага или синтетические пленочные изоляционные материалы, высушенные и пропитанные жидким диэлектриком (касторовое и нефтяное масло, трихлордифенил и т. д.) под вакуумом.

Отечественные малоиндуктивные импульсные конденсаторы выполняются в металлическом баке, имеющем специальный малоиндуктивный коаксиальный вывод, или в баке с изоляционной крышкой, имеющей выводы в виде двух рядов болтов, разделенных изоляционной перегородкой.

Нормальная работа конденсаторов обеспечивается в закрытых электропомещениях при температуре окружающего воздуха от —35 до +40 °С, относительной влажности не более 80 % и атмосферном давлении 0,085—0,105 МПа. Рабочее положение — вертикальное, выводами вверх.

Импульсные конденсаторы в металлических корпусах типов ИМ-0,5-250 (рис. 21.15) и ИМ-3-100 по конструкции не отличаются от низковольтных косинусных конденсаторов. Они применяются в конденсаторных сварочных машинах, в которых сварка металлов

Таблица 21.26. Импульсные конденсаторы

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная емкость, мкФ	Собственная индуктивность, нГн	Тангенс угла потерь при 50 Гц	Масса, кг	Цена, руб.	ТУ
ИМ-0,5-250	0,5	250	200	—	24	—	16.521.121-80
ИМ-3-30	3	30	—	0,0023	30	—	16.521.121-80
ИМ-3-100	3	100	400	—	25	—	16.521.121-80
ИМ-3-230	3	230	—	—	62	—	—
ИМ-5-140	5	140	500	0,0045	62	—	16.521.046-80
ИМ-20-0,5	20	0,5	400	—	24	—	—
ИМ-40-0,9У3	40	0,9	300	—	32	85	16.521.220-76
ИМ-70-0,1У3	70	0,1	300	—	11	57	16.521.220-76
ИМГ-30-1	80	1	400	—	730	—	—
ИМК-40-0,3У3	40	0,3	300	—	32	137	16.521.220-76
ИМК-70-0,1У3	70	0,1	300	—	32	131	16.521.220-76
ИМК-100-0,05У3	100	0,05	300	—	32	132	16.521.220-76
ИМ-60-0,2У3	60	0,2	500	—	32	101	16.521.190-75
ИМН-100-0,1	100	0,1	500	—	32	83	—
ИМН-6-36×2М4	6	72	500	—	48	108	—
ИМ-2-5-140У4	5	140	500	—	50	88	16.527.217-79Е
ИМН-1-5-140У2	5	140	500	—	50	115	16.521.231-77
ИС-20-0,5У3	20	0,5	500	—	28	75	16.521.159-78
ИС-16-0,8У3	16	0,8	500	—	28	70	16.521.159-78
ИС-20-6,55	20	6,55	1000	—	46	100	—
ИС-6-5,5У3	6	5,5	500	—	28	78	16.521.159-78
ИС-4-13У3	4	13	500	—	28	77	16.521.159-78
ИС-2-52У3	2	52	500	—	28	82	16.521.159-78
ИС-25-13УХЛ4	25	13	350	—	120	324	16.521.245-78
ИС-5-200У2	5	200	350	—	55	123	16.521.047-77Е
ИС-6-200УХЛ2	6	200	350	—	54	328	16.521.182-79
ИС-2-8-300У3	2,8	300	800	—	55	148	16.521.189-75
ИК-25-12У4	25	12	40	—	120	283	16.521.152-80Е
ИК-40-5У4	40	5	40	—	120	316	16.521.152-80Е
ИК-50-3У4	50	3	40	—	120	282	16.521.152-80Е
ИКМ-25-12У4	25	12	25	—	120	480	16.521.253-78Е
ИКМ-50-3У4	50	3	25	—	120	482	16.521.253-78Е
ИК-25-13У4	25	13	350	—	120	285	16.521.170-79Е
ИК-10-50У4	10	50	500	—	50	235	16.521.149-80Е
ИК-6-150ТС4	6	150	60	—	50	143	16.521.148-79Е
ИК-200-0,1	200	0,1	200	—	32	106	16.521.209-79Е
ИК-100-0,25У4	100	0,25	150	—	32	105	16.521.209-79Е
ИК-100-0,4У4	100	0,4	150	—	32	97	16.521.209-79Е

осуществляется большим током, возникающим при разряде конденсатора. Работают в режиме аperiodического разряда с частотой следования импульсов до 90—100 в минуту. Конденсатор ИМ-0,5-250 имеет четыре ступени емкости: 125, 25, 50 и 50 мкФ, имеются также встроенные предохранители. Интервал рабочих температур $\pm 35^\circ\text{C}$.

Конденсаторы ИМ-3-230 и ИМ-5-140 по конструкции не отличаются от косинусных конденсаторов II габарита. Они служат для получения мощных импульсов тока при научных ис-

следованиях и для других целей. Режим работы: сильнозатухающий разряд, ток в импульсе до 2,5 кА; частота следования импульсов — до 10 в минуту. Оба вывода конденсатора изолированы от корпуса.

Конденсатор ИС-5-200 служит для замены конденсатора ИМ-5-140 и работает в режиме: заряд — до 5 кВ, максимальная амплитуда разрядного тока — до 10 кА, время цикла заряд—разряд — не менее 6 с. Работает в закрытом помещении при атмосферном давлении 0,085—1,05 МПа, температуре окружающего воздуха от -10 до $+40^\circ\text{C}$ и относительной влажности не более 80 %.

Конденсатор типа ИМ-3-30 имеет время заряда до номинального напряжения 25 мс, время полного разряда 50 мкс.

Импульсные конденсаторы типа ИМН на напряжения 3—6 кВ рассчитаны на работу в режиме частичного разряда в течение 0,1 с с частотой следования импульсов до 30 в минуту.

Конденсаторы типа ИМП-1-5-140У2 предназначены для работы в различных схемах с режимом: заряд — до напряжения 4,5 кВ, разряд — за 0,1 с до напряжения 4,25 кВ, частота следования циклов — не более 50 в минуту, ресурс 3000 ч.

Конденсаторы серии ИС предназначены для работы в передвижных установках. Конденсаторы ИС-6-200УХЛ2 изготавливаются с пропиткой трихлордифенилом, каждая секция конденсатора защищена индивидуальным предохранителем.

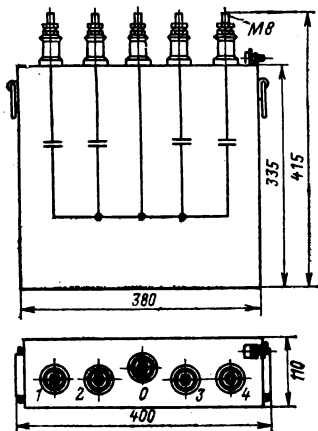


Рис. 21.15. Конденсатор типа ИМ-0,5-250

Конденсатор ИС-20-6,65 работает в режиме слабозатухающего разряда с разрядным током до нескольких десятков килоампер.

Взамен конденсаторов типов ИМ-20-8, ИМ-30-3 и ИМ-50-3 разработаны конденсаторы ИК-25-12У4, ИК-40-5У4 и ИК-50-3У4 с пропиткой касторовым маслом.

Конденсатор ИМ-20-0,5 используется в линиях формирования при частоте следования до 15 Гц. Габариты корпуса $380 \times 110 \times 370$ мм. Конденсатор снабжен одним высоковольтным фарфоровым выводом, другой вывод его соединен с корпусом.

Конденсаторы на повышенное напряжение (до 100 кВ и выше) изготавливаются в металлических корпусах с крышкой из электроизоляционного материала (винипласта) или же с металлической крышкой и проходным фарфоровым изолятором. Их выемная часть состоит из пакетов, соединенных между собой параллельно. Секции в пакетах соединены смешанно.

К группе крупногабаритных импульсных конденсаторов относятся также конденсаторы типа ИМГ для установок с использованием электрогидравлического эффекта.

Конденсатор ИМГ-80-1 имеет разрядный ток до 7,5 кА с фактическим сроком службы более 10^5 импульсов. Выемная часть конденсатора состоит из 12 параллельно соединенных пакетов. Секции в пакетах соединены последовательно. Конденсатор имеет один высоковольтный фарфоровый вывод, закрепленный с помощью болтов. Другой вывод соединен с корпусом. Предназначен для длительной работы в установках при прямоугольной форме напряжения ± 45 кВ с частотой перезарядов до 35 в секунду.

Конденсаторы на повышенные напряжения часто изготавливают в корпусах из электроизоляционных материалов (пластмасс, эпоксидного компаунда) с целью улучшения изоляции от корпуса.

Конденсатор ИМН-100-0,1 изготавливается в литом корпусе прямоугольной формы из термопласта. Разрядный ток — до 10 кА. Конденсатор работает в режиме полного одиночного разряда или в режиме частичного разряда с большой частотой следования импульсов (до 200 Гц). Применяется в емкостных накопителях и других установках.

Конденсаторы высокого напряжения типа ИК-200-0,1; ИК-100-0,25У4 и ИК-100-0,4У4 предназначены для работы в схемах генераторов импульсных напряжений и токов. Выводы конденсаторов должны иметь защитные покрытия, стойкие к атмосферным воздействиям. Расстояние между основаниями конденсаторов должно быть не менее 10 мм.

Корпус конденсаторов — из эпоксидного компаунда. Конденсаторы имеют съемную перемычку, замыкающую выводы накоротко в нерабочем состоянии.

Кроме импульсных конденсаторов выпускают генераторы импульсных напряжений (ГИН), которые предназначены для получения кратковременных импульсов высокого напряжения при различных лабораторных исследованиях. Конденсаторы ГИН-500-0,02/5 и ГИН-400-0,06/5 состоят из пяти конденсаторных пакетов емкости по 0,02 мкФ и резисторов $R_1 = 48$ кОм. $R_2 = 12$ кОм (тип резистора ТВО-10), собранных по схеме рис. 21.16 в общий цилиндриче-

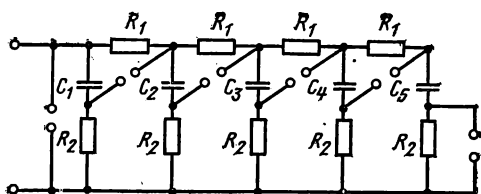


Рис. 21.16. Схема импульсного генератора ГИН-500-0,02/5

ский корпус из бакелитизированной бумаги и залитых минеральным маслом; уплотнения — из маслостойкой резины. Разрядные шары вынесены на наружную поверхность корпуса. Масса генераторов составляет около 90 кг, в том числе свободного масла, 10 кг. Оптовая цена за генератор 335 руб. Изготавливаются генераторы по ТУ 16.521.103-70.

Кроме описанных импульсных конденсаторов изготавливаются специальные конденсаторы типа ДС6-24, применяемые в медицине, и малоиндуктивные конденсаторы для исследований.

Конденсаторы для силовых полупроводниковых преобразователей

Конденсаторы являются неотъемлемыми элементами большинства силовых полупроводниковых преобразователей. Несмотря на многообразие функций, выполняемых конденсаторами в преобразователях, все конденсаторы можно условно разделить по их основному назначению на коммутирующие, демпфирующие, фильтровые (сглаживающие) и компенсирующие.

Коммутирующие конденсаторы предназначены для принудительного (искусственного) выключения силовых управляемых, а в ряде случаев и неуправляемых вентилях. Емкость коммутирующего конденсатора в зависимости от мощности преобразователя может составлять от единиц до 1000 мкФ при напряжении от десятков до тысяч вольт. Форма кривой напряжения на коммутирующих конденсаторах обычно близка к синусоидальной, треугольной или трапециевидной с линейными либо косинусоидальными фронтами.

В наиболее общем виде форма напряжения на коммутирующем конденсаторе изображена на рис. 21.17. В зависимости от соотношения длительностей фронтов ($t_{\phi 1}$, $t_{\phi 2}$, $t_{\phi 3}$) и пауз ($t_{в1}$, $t_{в2}$, $t_{в3}$) получаем кривые, соответствующие условиям работы коммутирующих конденсаторов в различных схемах. Например, при $t_{в1} = t_{в3}$, $t_{в2} = 0$, $t_{\phi 1} = t_{\phi 2} + t_{\phi 3}$ и одинаковой форме напряжения на фронтах получаем симметричную трапецию. При $t_{в1} = t_{в2} = t_{в3} = 0$, $t_{\phi 1} = t_{\phi 2} + t_{\phi 3}$ и косинусоидальной форме напряжения на фронтах получаем синусоидальное напряжение и т. д. Важным показателем является коэффициент повторения $k_p = t_p / (t_p + t_n)$, где t_p — время работы; t_n — время паузы.

Нередко коммутирующие конденсаторы работают при наличии постоянной составляющей напряжения. Частота в зависимости от типа и назначения преобразователя может лежать в диапазоне от десятков герц до единиц и десятков килогерц. Иногда в процессе работы

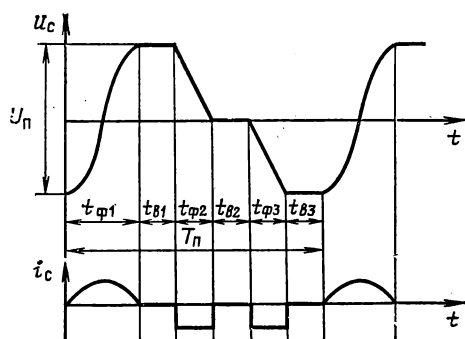


Рис. 21.17. Обобщенная кривая напряжения U_C и тока i_C конденсатора, характерная для вентильного преобразователя

преобразователя частота и форма напряжения на конденсаторе существенно изменяются. Ток, протекающий через коммутрующий конденсатор, практически всегда имеет резко несинусоидальную форму, а при трапецеидальной кривой напряжения ток имеет форму импульсов (рис. 21.17) с повышенными амплитудными и действующими значениями. Последнее предъявляет повышенные требования к токоведущим частям конденсатора.

Отечественной промышленностью выпускаются конденсаторы, предназначенные для использования в качестве коммутующих, в том числе с бумажно-плёночным диэлектриком и фольговыми обкладками (типы ГСТ, РСТ, РСТО, ПС, ПСК, см. табл. 21.27) и с чисто плёночным диэлектриком и металлизированными обкладками (типы ПТ, ПТР, ПЖ). Конденсаторы указанных типов имеют усиленные токоведущие части. Конденсаторы с металлизированными обкладками обладают свойством самовосстановления после пробоя изоляции за счет испарения фольги в месте пробоя. Учитывая разнообразие требований к коммутующим конденсаторам в различных преобразователях, нередко приходится использовать конденсаторы указанных типов в режимах, отличных от оговоренных в ТУ, либо в качестве коммутующих использовать конденсаторы, разработанные для других целей.

Демпфирующие конденсаторы служат для защиты элементов преобразователя от перенапряжений, возникающих как в самом преобразователе, так и во внешних цепях (питающая цепь, нагрузка). В зависимости от места подключения демпфирующего конденсатора напряжение на его обкладках может быть близко к синусоидальному (демпфирующие цепочки на входе зависимых преобразователей) либо может существенно отличаться от синусоиды (демпфирующие цепочки, подключаемые параллельно вентилям). Нередко напряжение на демпфирующих конденсаторах содержит постоянную составляющую (например, RC -цепи для демпфирования переменного напряжения, подключенные через вентильные мосты).

Емкость демпфирующих конденсаторов составляет от сотых долей до единиц, редко десятков микрофарад. С учетом повышения напряжения на элементах преобразователя в

переходных либо аварийных режимах напряжение на обкладках демпфирующих конденсаторов может в 1,5—2 раза превышать напряжение в стационарном режиме. В зависимости от типа преобразователя рабочая частота демпфирующих конденсаторов лежит в диапазоне от единиц герц до десятков килогерц.

Отличительной особенностью режима работы демпфирующих конденсаторов является импульсный характер тока со значительной амплитудой и большой скважностью. При этом нагрузка конденсаторов по действующему значению тока в некоторых случаях также может быть значительной. Для эффективного ограничения перенапряжений конденсаторы должны иметь минимальную индуктивность.

В качестве демпфирующих чаще всего используются конденсаторы с бумажным диэлектриком (типы МБГЧ, К42-4, К40У-5, К40У-9), бумажно-плёночным (К75-10, К75-24) (см. табл. 21.27) или плёночным (К73П-4, К73П-2, К78-2, К78-3) диэлектриком. Конденсаторы с бумажно-плёночным и плёночным диэлектриками наиболее эффективно использовать в преобразователях повышенной частоты.

Фильтровые конденсаторы, работающие на переменном токе, служат для фильтрации вышедших гармоник, генерируемых преобразователем в питающую сеть либо в нагрузку. Фильтровые (сглаживающие) конденсаторы, используемые в цепях постоянного тока, описаны выше (см. с. 152).

Форма напряжения и тока через конденсатор существенно зависят от схемы фильтра и режима работы преобразователя. Фильтровые конденсаторы, установленные параллельно входу или выходу преобразователя, как правило, подвержены перегрузкам по напряжению, возникающим в переходных и аварийных режимах. В схемах фильтров, содержащих конденсаторы, включенные последовательно с нагрузкой, превышение напряжения на конденсаторах пропорционально кратности аварийного тока. Напряжение на фильтровых конденсаторах обычно имеет близкую к синусоидальной форму, однако кривая тока может значительно отличаться от синусоиды, что следует учитывать при определении нагрузки конденсаторов по току. Рабочая частота может быть равна входной или выходной частоте преобразователя либо (для конденсаторов, используемых в резонансных фильтрах) частоте k -й гармоники входного или выходного напряжения, где обычно $k=5, 7, 11, 13 \dots$

Емкость фильтровых конденсаторов составляет от десятых долей до сотен микрофарад при частоте переряда от десятков герц до десятков (иногда сотен) килогерц.

В схемах фильтров, предназначенных для подавления радиопомех, генерируемых преобразователями в питающую сеть, используются специальные малоиндуктивные конденсаторы типов К75П-5, К75П-4 (см. разд. 63).

Компенсирующие конденсаторы предназначены для компенсации реактивной мощности преобразователя или нагрузки.

Режим работы компенсирующих конденсаторов, включенных на стороне питающей сети (50 Гц) выпрямителей, или конденсаторов, используемых в схемах статических компенсаторов реактивной мощности, близок к режиму

работы силовых косинусных конденсаторов (см. выше, с. 147). В этих случаях могут использоваться конденсаторы типов КС, КС1, КС2, КСК. Однако следует учитывать, что часто в кривой напряжения и тока компенсирующих конденсаторов для преобразователей имеет место повышенное содержание высших гармоник.

В автономных инверторах тока функция компенсации реактивной мощности обычно совмещается в одних и тех же конденсаторах с функциями коммутации тиристоров и фильтрации выходного напряжения. В этих схемах форма напряжения на конденсаторах может заметно отличаться от синусоидальной, а частота составляет десятки или сотни герц.

Важную роль играют конденсаторы в схемах автономных резонансных инверторов, где они компенсируют индуктивную составляющую тока или напряжения нагрузки и обеспечивают тем самым колебательный характер кривой анодного тока тиристоров. Такие инверторы все шире используются для индукционного нагрева на повышенной частоте, причем в случае системы централизованного питания отдельные нагрузки вместе с компенсирующими конденсаторами бывают удалены от инвертора. Рабочая частота в подобных установках составляет сотни герц — десятки килогерц. Промышленность выпускает для этих целей конденсаторы типов ЭС, ЭСВ, ЭСК, ЭСКВ (см. табл. 21.27).

В табл. 21.28 для некоторых типовых кривых напряжения приведены выражения для расчета мощности потерь в конденсаторах, действующего значения тока, средней частоты и коэффициента увеличения потерь (см. [21.19]).

Выбор конденсаторов для работы в режимах, отличных от оговоренных в ТУ

Многообразие областей применения и режимов работы конденсаторов в преобразователях определяет нецелесообразность разработки конкретных типов конденсаторов для каждого режима работы. При этом перед разработчиком преобразовательного устройства встает вопрос выбора типа, оптимального номинала и способа соединения конденсаторов в батарею при минимуме массогабаритных характеристик и заданной надежности. Для этого обычно бывает необходимо определить предельно допустимое напряжение заданной формы при заданной частоте, при котором эксплуатационные характеристики конденсатора (срок службы, надежность и т. д.) соответствуют требуемым или не ухудшаются по сравнению с оговоренными в ТУ.

В литературных источниках описаны различные методы решения указанной задачи. Наиболее полно, с учетом современных типов конденсаторов и их характеристик, методы выбора конденсаторов для работы в тиристорных преобразовательных установках изложены в [21.17—21.19].

На рис. 21.18 показана условная зависимость допустимого напряжения на обкладках конденсатора от частоты при постоянных внешних воздействиях и сроке службы. В различных зонах кривой (I—IV) ограничивающими факторами являются различные электрофизические процессы внутри конденсатора. В зоне I

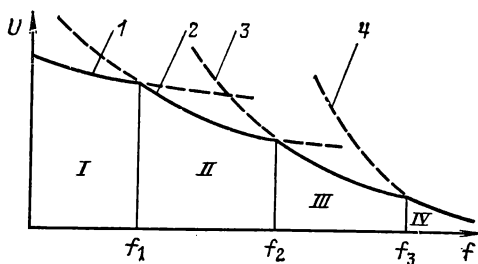


Рис. 21.18. Зависимость допустимого напряжения на конденсаторе от частоты при различных ограничивающих факторах в зонах I—IV

напряжение на обкладках конденсатора ограничено электрической прочностью изоляции и интенсивностью ионизационных процессов в диэлектрике (т. е. мощностью частичных разрядов, кривая 1). В зоне II определяющим фактором является температура внутри конденсатора, зависящая от активных потерь в его элементах (кривая 2). Напряжение в зоне III ограничено допустимыми токовыми нагрузками, т. е. действующим или амплитудным значением тока через токоведущие части конденсатора (кривая 3). В зоне IV определяющим является перегрев крышки и токовыводов конденсатора за счет поля, создаваемого вокруг токовыводов (кривая 4). Следует подчеркнуть, что чередование зон и граничные частоты (f_1 , f_2 , f_3) условны и существенно зависят от типа конденсатора, режима работы (формы напряжения) и внешних условий.

Строгий учет всей совокупности ограничивающих факторов требует знания конструктивных и технологических параметров конденсаторов, которые обычно не приводятся в справочных материалах заводов-изготовителей. Поэтому на практике при выборе конденсаторов для работы в конкретных условиях используют приближенные методы расчета электрического и теплового режимов. В этом случае, как правило, не удается полностью использовать конденсаторы, что обычно приводит к некоторому завышению массогабаритных характеристик батареи конденсаторов.

Обычно перед расчетом электротеплового режима конденсатора ограничивают количество рассматриваемых типов, руководствуясь следующими соображениями.

1. Наибольшей стабильностью основных параметров во времени обладают конденсаторы с пленочным и комбинированным диэлектриком и фольговыми обкладками, которые можно рекомендовать к применению в установках с повышенным сроком службы.

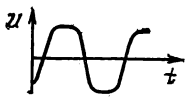
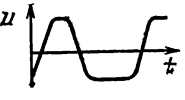
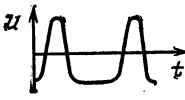
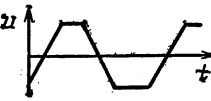
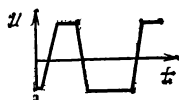
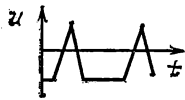
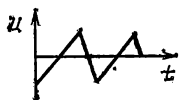
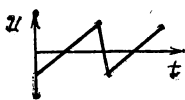
2. В установках, для которых свойственны частые перенапряжения, целесообразно использовать конденсаторы с комбинированным (бумажно-пленочным) диэлектриком, отличающимся большей стойкостью к частичным разрядам и повышенной электрической прочностью. Конденсаторы с металлизированными обкладками также можно считать устойчивыми к единичным перенапряжениям, поскольку они обладают свойством самовосстановления после пробоя за счет выгорания металлизированного слоя в месте пробоя. Однако при большой ин-

Т а б л и ц а 21.27. Конденсаторы для силовых полупроводниковых преобразователей

Тип конденсатора	Номинальные параметры					Долговечность, ч	Диэлектрик	Обкладки	Удельные параметры		Режим работы
	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$f, \text{Гц}$	$C_{\text{ном}}, \text{мкФ}$	$T_{\text{мин}}, T_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$					$qV_1, \text{квар/дм}^2$	$qV_2, \text{квар/кг}$	
ГСТ-150V2	3150	800 400	2,12 4,0	$-50 \div +40$		$5 \cdot 10^4$	Б+ПХД	Ф	2,8	1,4	Форма напряжения (рис. 21.17) ($t_{\text{в2}}=0$), линейные фронты, $k_{\text{П}}=0,5$. Охлаждение принудительное, воздушное, 10 м/с Форма напряжения (рис. 21.17) ($t_{\text{в1}}=t_{\text{в2}}=0$), $k_{\text{П}}=0,5$ Охлаждение принудительное воздушное, 10 м/с
РСТ-2-12V2 РСТ-2-4V2	3150	800 400	2,12 4,0	$-50 \div +40$		$5 \cdot 10^4$	Б+ПХД	Ф	2,8	1,4	
РСТО-2-6,15V2	3150	400	6,15	$-50 \div +40$		$5 \cdot 10^4$	Б+ПХД	Ф	4,2	2,1	
ПС-0,3-0,4	300	400	50,0	—		$4 \cdot 10^4$	Б+ТХД	Ф	3,6	1,9	Напряжение близко к синусоидальному
ПСК-0,45-30	400	250	30,0	$-50 \div +40$		$4 \cdot 10^4$	Б+ПП+ПХД	Ф	1,23	0,9	Коммутирующий, форма напряжения с косинусоидальными фронтами ($t_{\text{в2}}=0$), $t_{\text{ф1}}=t_{\text{ф2}}+t_{\text{ф3}}=110 \cdot 10^{-6}$ Аналогично ПСК-0,45-30 То же Коммутирующий, форма напряжения с косинусоидальными фронтами
ПСК-0,7-30 ПСК-1,25-40 ПСК-1,25-200 ПТ-160-0,1	700 1250 1230 160	70 60 60 100	30,0 40,0 200,0 2,5—250,0	$-50 \div +40$ $-50 \div +40$ $-50 \div +40$ $-50 \div +50$		$4 \cdot 10^4$ $4 \cdot 10^4$ $4 \cdot 10^4$ —	Б+ПП+ПХД Б+ПП+ПХД Б+ПП+ПХД ПЭТФ+ЭК	Ф Ф Ф ДМБ	0,77 2,74 3,7 1,6	0,55 2,0 2,0 1,25	
ПТ-160-0,5	160	500	40,0	$-50 \div +50$		—	ПП+ЭК	ДМБ	2,35	1,6	($t_{\text{в2}}=0$), $t_{\text{ф1}}=t_{\text{ф2}}+t_{\text{ф3}}=200 \cdot 10^{-6}$ с То же, $t_{\text{ф}}=150 \cdot 10^{-6}$ с
ПТ-300-0,4	300	400	10,0	$-50 \div +50$		—	ПП+ЭК	ДМБ	14,4	10,0	Коммутирующий, напряжение близко к синусоидальному
ПЖ-450-0,5	450	500	10,0	$-50 \div +45$		—	ПП+КО	ДМБ	16	10,5	Коммутирующий, форма напряжения с синусоидальными фронтами ($t_{\text{в2}}=0$), $t_{\text{ф1}}=t_{\text{ф2}}+t_{\text{ф3}}=200 \cdot 10^{-6}$ с То же, $t_{\text{ф}}=150 \cdot 10^{-6}$ с
ПЖ-600-1,2	600	1200	10,0	$-50 \div +50$		—	ПП+КО	ДМБ+Ф	17,5	12,5	
ПЖ-2000-0,5 К77-5	2000 250—750	500 3000	10,0 0,22—0,7	$-50 \div +50$ $-60 \div +70$		— 3000	ПП+КО ПК	ДМБ+Ф МТ	35 4,8—6,4	21 2,6—3,8	То же, $t_{\text{ф}}=200 \cdot 10^{-6}$ с Работа при $k_{\text{П}}=0,2$
К72-11	125—1000	10 000	0,047—4,7	$-60 \div +70$		3000	ПТФЭ+КО	Ф	7—31	2—10	Напряжение синусоидальное, $k_{\text{П}}=0,5$ Повышение коэффициента мощности электротермических установок
ЭС	500—2000	500—1000	2,475—19,8	$-10 \div +35$		10^5	Б+ТХД	Ф	1,4—2,4	0,6—1,1	Повышение коэффициента мощности электротермических установок, охлаждение водяное
ЭСВ	500—20,0	500—10 000	4,9—99,5	$+5 \div +40$		—	Б+ТХД	Ф	12—25	6—11	Работа в цепях постоянного пульсирующего переменного напряжения То же
МВГЧ	250—1000	50	0,25—10,0	$-60 \div +70$		$5 \cdot 10^3$	Б+В	МТ	1,2—1,4	0,6—0,75	
К75-10 К75-24	250—1000 400—1600	50 50	0,1—10,0 0,47—10,0	$-60 \div +100$ $-60 \div +125$		$5 \cdot 10^3$ $10 \cdot 10^3$	Б+ПЭТФ+О Комбинированный	МТ МТ	1,4—1,6 —	0,75—0,8 —	

Примечание. Б — бумага, ПХД — полихлоридфенил, ТХД — трихлоридфенил, ПП — полипропилен, ПЭТФ — полиэтилентерефталат (лавсан), ЭК — эпоксидный компаунд, КО — кремнийорганическая жидкость, В — вазелин, М — масло, О — октол, Ф — фольга, МТ — металлизация, МДВ — двустороннеметаллизированная бумага.

Таблица 21.28. Выражения для расчета мощности потерь, действующего значения тока, средней частоты и коэффициента увеличения потерь при типовых формах кривой напряжения на конденсаторах

Форма напряжения	Параметры	Мощность потерь	Действующее значение тока	Средняя частота, Гц	Коэффициент увеличения потерь
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = t_{\phi}$ $t_{B1} = t_{B2}$	$\frac{1,5}{T_{\Pi}} U_{\Pi}^2 C \operatorname{tg} \delta_{\text{ср}} \times$ $\times \lg 1,8 \frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}$	$\frac{\pi U_{\Pi} C}{2 T_{\Pi}} \sqrt{\frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}}$	$\sqrt{\frac{1}{2 T_{\Pi} t_{\phi}}}$	$1,9 \lg 1,8 \times$ $\times \frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2}$ $t_{B1} \neq t_{B2}$	$\frac{1,4}{T_{\Pi}} U_{\Pi}^2 C \operatorname{tg} \delta_{\text{ср}} \times$ $\times \lg \frac{t_{B1} + t_{\phi}}{0,17 t_{\phi}}$	$\frac{\pi U_{\Pi} C}{2 T_{\Pi}} \sqrt{\frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}}$	$(2 t_{\phi} T_{\Pi})^{-1/2} \div$ $\frac{0,3}{t_{\phi}}$	$1,8 \lg \frac{t_{B1} + t_{\phi}}{0,17 t_{\phi}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2}$ $t_{B1} = 0$	$\frac{1,1}{T_{\Pi}} U_{\Pi}^2 C \operatorname{tg} \delta_{\text{ср}}$	$\frac{\pi U_{\Pi} C}{2 T_{\Pi}} \sqrt{\frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}}$	$\frac{0,3}{t_{\phi}}$	1,4
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = t_{\phi}$ $t_{B1} = t_{B2}$	$\frac{1,5}{T_{\Pi}} U_{\Pi}^2 C \operatorname{tg} \delta_{\text{ср}} \times$ $\times \lg 1,4 \frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}$	$\frac{\sqrt{2} U_{\Pi} C}{T_{\Pi}} \times$ $\times \sqrt{\frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}}$	$(2 T_{\Pi} t_{\phi})^{-1/2}$	$1,9 \lg 1,4 \frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2}$ $t_{B1} \neq t_{B2}$	$\frac{1,4}{T_{\Pi}} U_{\Pi}^2 C \operatorname{tg} \delta_{\text{ср}} \times$ $\times \lg \frac{t_{B1} + t_{\phi}}{0,22 t_{\phi}}$	$\frac{\sqrt{2} U_{\Pi} C}{T_{\Pi}} \times$ $\times \sqrt{\frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}}$	$(2 T_{\Pi} t_{\phi})^{-1/2} \div$ $\frac{0,3}{t_{\phi}}$	$1,8 \lg \frac{t_{B1} + t_{\phi}}{0,22 t_{\phi}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2}$ $t_{B1} = 0$	$\frac{0,9}{T_{\Pi}} U_{\Pi}^2 C \operatorname{tg} \delta_{\text{ср}}$	$\frac{\sqrt{2} U_{\Pi} C}{T_{\Pi}} \sqrt{\frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}}$	$\frac{0,3}{t_{\phi}}$	1,1
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = T_{\Pi}/2$ $t_{B1} = t_{B2} = 0$	$\frac{0,54}{T_{\Pi}} U_{\Pi}^2 C \operatorname{tg} \delta_{\text{ср}}$	$\frac{2 U_{\Pi} C}{T_{\Pi}}$	$\frac{1}{T_{\Pi}}$	0,7
	$t_{\phi 1} > t_{\phi 2} = t_{\phi}$ $t_{B1} = t_{B2} = 0$	$\frac{0,73}{T_{\Pi}} U_{\Pi}^2 C \operatorname{tg} \delta_{\text{ср}} \times$ $\times \left(\frac{T_{\Pi}}{T_{\Pi} - t_{\phi}} \right)^2 \times$ $\times \lg 0,7 \frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}$	$\frac{U_{\Pi} C}{T_{\Pi}} \times$ $\times \sqrt{\frac{T_{\Pi}}{T_{\Pi} - t_{\phi}} + \frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}}$	$\frac{1}{T_{\Pi}} \div \frac{0,11}{t_{\phi}}$	$0,93 \left(\frac{T_{\Pi}}{T_{\Pi} - t_{\phi}} \right)^2 \times$ $\times \lg 0,7 \frac{T_{\Pi}}{t_{\phi}}$

Примечания: 1. Значение $\operatorname{tg} \delta_{\text{ср}}$ определяется для усредненной частоты, рассчитываемой по формуле пятого столбца таблицы.

2. K_P — определяет увеличение потерь в конденсаторе при несинусоидальном напряжении на обкладках по сравнению с синусоидальным той же частоты $1/T_{\Pi}$.

тенсивности пробоев заметно уменьшение емкости конденсаторов.

3. Наличие постоянной составляющей в напряжении (характерное для демпфирующих и некоторых коммутирующих конденсаторов) ведет к ускоренному электрохимическому старению диэлектрика. Конденсаторы с пропиткой хлорированными дифенилами (типов ПСК, ГСТ и др.) вообще не допускают работы с напряжениями, имеющими значительную постоянную составляющую, либо при инфранизких частотах.

4. При больших скачках тока через конденсатор (демпфирующие, некоторые режимы коммутирующих конденсаторов), т. е. при $t_{\phi} \ll T_n$ (см. рис. 21.17), лучше использовать конденсаторы с фольговыми обкладками, допускающие значительные импульсные нагрузки по току.

5. На частотах до 200 Гц, как правило, наиболее перспективно использование конденсаторов с полярным диэлектриком (МБГЧ, К-40, К-41, К-73 и т. д.), на более высоких частотах — конденсаторов со слабополярным и комбинированным диэлектриком (К-75, К-77). На частотах свыше 1 кГц перспективны конденсаторы с непolarным пленочным диэлектриком (К-71, К-72 и др.).

21.3. РЕАКТОРЫ

Назначение и классификация

Реактор — это статическое электромагнитное устройство, предназначенное для использования его индуктивности в электрической цепи.

Основной характеристикой реактора является его вебер-амперная характеристика — зависимость результирующего потокосцепления от тока. В зависимости от этой характеристики реакторы делятся на реакторы с линейной, ограничено линейной и нелинейной характеристиками.

В первых вебер-амперная характеристика линейна при токах, во много раз превышающих номинальное значение. Во вторых вебер-амперная характеристика практически линейна в заданном ограниченном диапазоне значений токов. В третьих реактор имеет существенно нелинейную вебер-амперную характеристику, необходимую для выполнения его основной функции.

Реакторы могут делиться также по другим признакам: назначению, виду магнитной системы, особенностям обмоток, количеству фаз, возможности изменения индуктивности, виду охлаждения и др. Классификация реакторов в зависимости от вида установки, способа включения, назначения и применяемого исполнения представлена табл. 21.29.

Преобразовательные реакторы

Отдельную и весьма многочисленную группу составляют реакторы, предназначенные для использования в вентильных преобразователях электрической энергии или совместно с такими преобразователями. К этой группе можно также условно отнести реакторы для устройств и сетей постоянного тока, поскольку их режимы работы весьма схожи с режимами реакто-

ров, включаемых в цепи постоянного тока преобразователей.

Реакторы, входящие в данную группу, в зависимости от места их включения в схему преобразователя сильно различаются условиями работы и требованиями к их основным характеристикам, отсюда и большие различия в их конструкциях.

В число реакторов, включаемых на стороне переменного тока преобразователей, входят:

токоограничивающие реакторы, предназначенные для ограничения амплитуды тока и (или) скорости его нарастания при пробое вентилей или при коротком замыкании на выходе преобразователя;

реакторы помехоподавления, входящие в состав высокочастотных фильтров, применяемых для ограничения радиопомех, генерируемых преобразователем и распространяемых по проводам питающей или приемной сети (см. разд. 63);

фильтровые (сглаживающие) реакторы, входящие в состав резонансных, Г-образных или более сложных LC-фильтров низких частот, служат для уменьшения содержания высших гармоник в кривой тока, потребляемого преобразователем от сети переменного тока или отдаваемого преобразователем в сеть; такие реакторы, входящие в состав Г- или П-образных фильтров, часто могут также служить и как токоограничивающие, и в некоторой степени как помехоподавляющие. К фильтровым относятся также реакторы, включаемые в цепи постоянного тока преобразователей с целью его сглаживания.

В обмотке фильтровых реакторов протекает переменный или постоянный ток с большим или меньшим содержанием высших гармоник;

коммутирующие реакторы, используемые в цепях принудительной (искусственной) коммутации автономных инверторов или других преобразователей с конденсаторной коммутацией.

К подгруппе токоограничивающих реакторов относятся фазные и задерживающие фазные реакторы, включаемые в цепи фазного тока преобразователей, выполненных по мостовым схемам. Фазные реакторы служат для уменьшения амплитуды и (или) скорости нарастания тока при авариях (коротких замыканиях) в цепи преобразователя. Задерживающие фазные реакторы имеют магнитопровод с резким насыщением и служат для задержки (на время порядка десятков микросекунд) скачка в кривой тока тиристоров при их включении, что необходимо для снижения в них коммутационных потерь мощности. К реакторам, включаемым на вентильной стороне трансформаторов, относятся также вентильные реакторы. Эти реакторы в соответствии с указанными в табл. 21.29 названиями могут предназначаться: для ограничения амплитуды тока вентилей при коротких замыканиях или для уменьшения скорости нарастания тока при включении тиристоров с целью снижения в них коммутационных потерь мощности, для задержки скачка в кривой тока тиристоров с той же целью, для деления тока между параллельно включенными вентилями, для регулирования тока в цепи нагрузки за счет изменения подмагничивания (подобно магнитному усилителю).

Т а б л и ц а 21.29. Классификация электрических реакторов

Реакторы для устройств и сетей переменного тока																		
Вид установки или сети	Реакторы последовательного включения																	
Способ включения реактора	Токоограничивающие реакторы										Реакторы параллельного включения				Реакторы, включаемые в нейтраль заземляющие			
	Для электрических сетей		Ударный	пусковой	электропечной	устройства РПН	переходный	сварочный	регулируемый	зарядителя	делительный	шунтирующий	шунтирующий с отбором мощности	симметрирующий	напряженный	дугогасящий	токоограничивающий	
	одинарный	сдвоенный																
1. Вебер-амперная характеристика	Л	Л	Л	Л, О	О	О	О	О	Н, О*	Л	О	О	О	О	О*	О	Л, О*	
2. Вид магнитной системы	—	—	—	—, 3	3	3	3	3	0, 3*	—	—, 0,3	3, Б	3, Б	3	—, 0,3	3,0	—, 3*	
3. Особенности обмоток	—	2	—	—	—	—, 2	2	—	С, —	—	—, С	—, С	Д	—, Д	С	Д	—	
4. Число фаз	1, (3)	1, (3)	1, (3)	3	1,3	3,1	3,1	1	1,3	1	1,3*	1,3	1	3	3	1	1	
5. Регулирование	—	—	—, Б*	—	—, Б	—	—	—, Б, Н	Н	—	—	—, Н*	—	—	—, Б, Н	Б, Н*	—	
6. Охлаждающая среда	С, М*	С	С	С, М	М, С	М, С*	М, С*	С	М, С	С	С	М, С*	М	М, С	М	М, С*	С, М	

Продолжение табл. 21.29

Продолжение табл. 21.2

Вид установки или сети	Реакторы для устройств и сетей переменного тока						Преобразовательные реакторы и реакторы для устройств и сетей постоянного тока													
	Компенсирующий реактор	Реактор емкости от-бора мощности	Фильмовый реактор	Реактор ограничения напряжения на емкости	Реактор для параметри-ческого источника тока	Реакторы, включаемые в цепи переменного тока				Реакторы, включаемые в цепи собственного преобразователя						Реакторы, включаемые в це-пи постоянного тока				
						Фильмовый		Коммутирующий	Задерживающий			Вентильный	Задерживающий вентильный	Регулирующий насыщающийся вентильный	Сглаживающий	Линии постоян-ного тока	Уравнительный	Ограничивающий		
						последователь-ного включения	преобра-зователь-ный токо-ограничи-вающий		поме-хопо-давле-ния	Фазный	Задерживающий								Вентильный	Задерживающий вентильный
Способ включения реактора																				
Назначение и назва-ние реактора																				
	1. Вебер-амперная характеристика	О*	О	О*	Н*	О	Л	О	О, Н	О, Л	Н	О, Л	Н	О	Н	О	О	О	О, Н	О, Н
	2. Вид магнитной си-стемы	—	3	3, —*	0	3	3, —	—	3, —	3, —	0	3, —	0, —	3,0	0	3, С	—, Б	3	3,0	3,0
	3. Особенности обмо-ток	—	—	—	—	—	—	—	—, Д	—	—, Д*	—	—, Д*	—, С	—, Д	—	—	2, С	—	—
4. Число фаз	1	1	1	1	1, (3)	1,3	1	1	1	1	1, (3)*	1	1, (3)*	1	1, (3)*	1	1	1	1	1
	—	—, Б	Б*, Н	—	—	—	—	—	Б, Н*	—	—	—	—	—	Н	—	—	—	—	—
5. Регулирование	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6. Охлаждающая сре-да	С, М	С, М	М, С	М, С	М, С	С, М	С, М*	С	С, М*	С	С, М*	С	С, М*	С, М	С, М	С, М	М	С, М*	С, М*	С, М*

* Применяется редко.

Примечание. Классификация реакторов по назначению и применяемые исполнения: 1. Вид требуемой вебер-амперной характеристики: Л — линейная; О — ограниченно-линейная; Н — нелинейная.

2. Применяемый на практике вид магнитной системы: О — замкнутая; 3 — с зазорами; Б — броневая; С — стержневая без ярма; — (прочерк) — магнитная система отсутствует (реактор без стали).

3. Особенности обмотки (обмоток) реактора: 2 — сложенный реактор; Д — имеется дополнительная обмотка или отбор мощности; С — части обмотки соединены по сложной схеме или есть другие особенности обмотки; — (прочерк) — особенностей нет.

4. Применяемое на практике исполнение реактора по количеству фаз: 1 — однофазный реактор; 3 — трехфазный реактор с существенной связью фаз магнитным полем; (3) — трехфазный реактор со слабой связью фаз магнитным полем.

5. Применяемый на практике вид регулирования: Б — без напряжения; Н — под напряжением; — (прочерк) — регулирование нет.

6. Применяемый на практике вид реактора по изолирующей и теплоотводящей средам: М — масляный реактор; С — сухой реактор.

Все вентильные реакторы работают при наличии постоянной составляющей в кривой тока, вызывающей подмагничивание магнитопровода; чтобы обеспечить малую зависимость индуктивности реактора от тока, магнитопровод выполняется с зазором либо же он вообще отсутствует.

Для получения резкого насыщения в вебер-амперной характеристике магнитопроводы задерживающих и регулировочных вентильных реакторов не имеют воздушного зазора и выполняются из материалов с прямоугольной петлей гистерезиса.

Коммутирующие и иногда некоторые другие виды вентильных реакторов работают при весьма коротких и быстро нарастающих импульсных токах и часто при повышенных частотах, в связи с чем их магнитопроводы должны выполняться из высококачественных магнитных материалов с малыми потерями; часто магнитопровод вообще отсутствует. Обмотки таких реакторов по этой же причине желательно выполнять из многожильного провода или кабеля с изолированными друг от друга жилами.

Реакторы, включаемые в цепи постоянного тока преобразователей, служат для:

сглаживания тока, т. е. для уменьшения содержания в нем высших гармоник (например, при выпрямлении); такие реакторы часто входят в состав сглаживающих Г-образных или более сложных LC-фильтров;

ограничения тока или его скорости нарастания при коротком замыкании в цепи постоянного тока за местом включения реактора;

ограничения уравнительного тока, который циркулирует в контуре, образованном параллельно включенными на общую нагрузку двумя (или большим числом) вентильными группами, работающими с некоторым взаимным фазовым сдвигом; такие реакторы воспринимают переменное напряжение, возникающее между соответствующими выводами этих вентильных групп, и ограничивают возникающий за счет этого напряжения уравнительный ток (разд. 40), поэтому они получили название уравнительных;

ограничения уравнительного тока в реверсивных преобразователях со встречно-парал-

лельными вентильными комплектами, возникающего из-за разности мгновенных значений напряжения выпрямительного и инверторного комплектов.

Магнитопровод всех реакторов, включаемых в цепи постоянного тока, во избежание насыщения всегда выполняется с воздушными зазорами. В особо крупных реакторах магнитопровод выполняется разомкнутым либо вообще отсутствует. Следует отметить, что наличие воздушного зазора желательно даже у уравнительных реакторов со средней точкой. Хотя в полуобмотках этих реакторов постоянный ток протекает в противоположных направлениях, необходимо предотвратить насыщение магнитопровода за счет постоянной составляющей результирующей МДС, которая возможна из-за небольшого различия постоянных составляющих токов в полуобмотках при нормальном режиме преобразователя либо из-за различных скоростей нарастания этих токов в переходных режимах.

Конструкция реакторов

Виды конструкций реакторов представлены на рис. 21.19. Реакторы с линейной вебер-амперной характеристикой выполняются по рис. 21.19, а и б. Эти реакторы обычно не имеют магнитопровода. Индуктивность их неизменна. По рис. 21.19, а выполняются бетонные токоограничивающие реакторы, размещаемые на воздухе без каких-либо ферромагнитных кожухов. По рис. 21.19, а выполняются также реакторы высокого напряжения (более 20 кВ). В этом случае реактор располагается в стальном баке с трансформаторным маслом. Для уменьшения потерь в баке от магнитного поля реактора применяют специальные магнитные шунты или размагничивающие экраны, что очень усложняет и утяжеляет реактор. По рис. 21.19, б выполняются тороидальные реакторы [21, 20], у которых внешнее магнитное поле практически равно нулю, что позволяет размещать их в стальных кожухах.

По рис. 21.19, в—д выполняются реакторы в основном с ограниченно-линейной характеристикой. Благодаря наличию в магнитной цепи

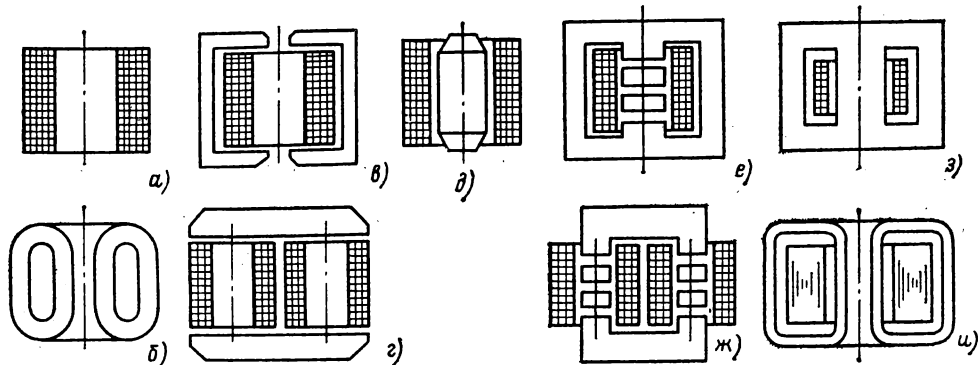


Рис. 21.19. Виды конструкции реакторов (показано только однофазное исполнение, хотя для случаев в, г, е, д, з возможно и трехфазное исполнение):

а, б — реакторы без стали с цилиндрической обмоткой и тороидальным; в, г — броневой и ярмовый реакторы, не имеющие стержня; д — стержневой без ярм реактор; е—ж — бронестержневой и стержневой реакторы с немагнитными зазорами в стержне; з, и — бронестержневой и тороидальный насыщающиеся реакторы

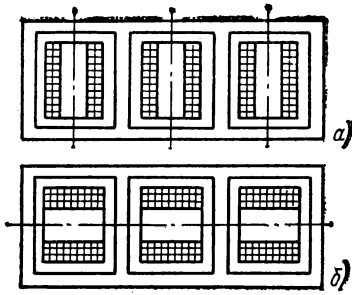


Рис. 21.20. Формы трехфазных магнитных систем реакторов без стержня

стали индуктивность возрастает на несколько десятков процентов. Значение тока, при котором вебер-амперная характеристика становится нелинейной, зависит от сечения стали.

По рис. 21.19, *е, ж* выполняются реакторы с большой индуктивностью. По сравнению с реакторами по рис. 21.19, *в, д* индуктивность возрастает в несколько раз примерно пропорционально отношению высоты обмотки к суммарной длине воздушных зазоров.

Реакторы, выполненные по рис. 21.19, *з, и*, обладают резко нелинейной характеристикой. Их динамическая индуктивность может меняться в сотни или даже тысячи раз.

Трехфазные реакторы без стержней могут выполняться с магнитной цепью (рис. 21.20, *а, б*).

Расчет и выбор основных параметров реакторов переменного тока

Расчет и выбор параметров реакторов подробно изложены в [21.21]. На рис. 21.21 представлены идеализированные реакторы, имеющие

только осевое и только радиальное магнитные поля.

Для броневого и ярового реакторов по рис. 21.19, *в* и *г* непосредственно применим расчет согласно рис. 21.21, *а*, для стержневых реакторов можно использовать схему рис. 21.21, *б*. Во всех других случаях (реакторы без стали, стержневые с зазорами) пригодны комбинации систем на рис. 21.21, *а* и *б*.

В табл. 21.30 приведены формулы электромагнитного расчета систем 21.21, *а* и *б*. В этой таблице $\alpha_{oc} = \alpha$ — относительная высота, $\beta_{oc} = \beta$ — относительная толщина обмотки, H_z — напряженность магнитного поля по оси z , W_{oc} — электромагнитная энергия реактора, L — индуктивность реактора, $P_{в, oc}$ — потери в реакторе, a_r и a_{oc} — радиальный и осевой размеры провода, P_r и P_{oc} — радиальные и осевые усилия, Iw_{oc} , Iw_r — МДС систем осевого и радиального магнитных полей, α_r , β_r — относительные высота и толщина обмотки радиальной системы.

Важнейшими параметрами реактора являются его индуктивность L и энергия магнитного поля W . Реактор на заданную индуктивность или энергию может иметь различные соотношения высоты и толщины. Задача выбора размеров реактора сводится к тому, чтобы обеспечить заданную индуктивность (или энергию) при минимальной массе активных материалов или при минимальных годовых затратах. Вопросы оптимизации рассмотрены в [21.30] и [21.31]. При оптимизации целевая функция N представляется уравнением

$$A = c_{об} G_{об} + c_{ст} G_{ст},$$

где $c_{об}$ и $c_{ст}$ — коэффициенты, относящиеся соответственно к обмотке и стали и зависящие от принятого критерия оптимизации. Эти коэффициенты выражаются через свойства, цены, коэффициенты использования материалов, электромагнитные нагрузки и др. При оптими-

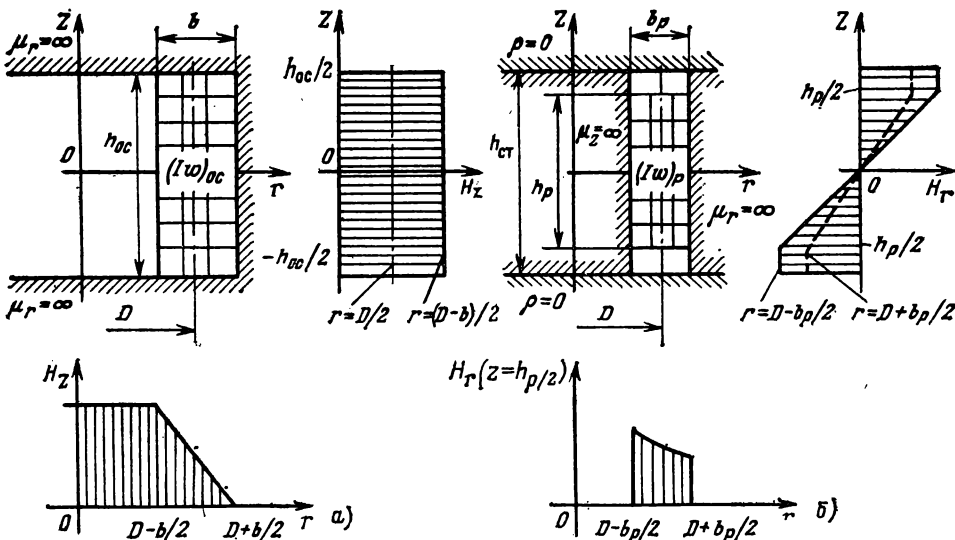


Рис. 21.21. Идеализированные электромагнитные устройства, имеющие только осевое (а) и только радиальное (б) магнитные поля

Т а б л и ц а 21.30. Формулы электромагнитного расчета идеализированных электромагнитных систем

Вид системы и эпюры	Безразмерные координаты и соотношения	Область определения поля	Напряженность поля	Энергия магнитного поля (индуктивность) $L = 2W/I^2$	Потери от вихревых токов в обмотках	Суммарные усилия
Рис. 21, а	$\alpha_{oc} = h_{oc}/D$ $\beta_{oc} = b/D$ $z' = \frac{1}{\alpha_{oc}} \frac{(D/2)}{(D/2)} z$ $r' = \frac{1}{D/2} r$	$-1 \leq z' \leq 1$ $0 \leq r' \leq 1$ $\leq 1 + \beta_{oc}$	$H_z = \begin{cases} \frac{I w_{oc}}{\alpha_{oc} D} & \text{при } 0 \leq r' \leq 1 - \beta_{oc} \\ \frac{I w_{oc}}{\alpha_{oc} D} \left(\frac{1 + \beta_{oc}}{2\beta_{oc}} - \frac{r'}{2\beta_{oc}} \right) & \text{при } 1 - \beta_{oc} \leq r' \leq 1 + \beta_{oc} \\ H_r = 0 & \end{cases}$	$W_{oc} = \frac{\mu_0}{2} \frac{(I w_{oc})^2}{1 - \frac{2}{3} \beta_{oc} + \frac{1}{3} \beta_{oc}^2} \times \frac{\pi D}{4} \times \frac{\alpha_{oc}}{\beta_{oc}^2} \approx \frac{\mu_0}{2} \frac{(I w_{oc})^2}{\left(1 - \frac{1}{3} \beta_{oc}\right)^2} \times \frac{\pi D}{4} \times \frac{1}{\alpha_{oc}}$	$P_{в,oc} = \frac{\mu_0 \omega^2}{12p} a_{oc}^2 k_{об} W_{м,oc} \times \frac{4}{3} \beta_{oc} - \frac{2}{3} \beta_{oc}^2 \approx \frac{\mu_0 \omega^2}{12p} a_{oc}^2 k_{об} W_{м,oc} \frac{4}{3} \beta_{oc}$	$P_p = \frac{\mu_0}{2} (I w_{oc})^2 \times \left(1 - \frac{1}{3} \beta_{oc}\right) \times \pi \frac{1}{\alpha_{oc}} \approx \frac{w_{oc}}{D} \frac{1}{1 - \frac{1}{3} \beta_{oc}}$
Рис. 21, б	$\alpha_p = h_p/D$ $\beta_p = b_p/D$ $I w_{oc} = \frac{h_{ст} - h_p}{\alpha_p D} z$ $z' = \frac{1}{\alpha_p} \frac{(D/2)}{(D/2)} z$ $r' = \frac{1}{D/2} r$	$-(1 + \lambda) \leq z' \leq (1 + \lambda)$ $1 - \beta_p \leq r' \leq 1 + \beta_p$	$H_z = 0$ $\frac{I w_p}{D \ln \frac{1 + \beta_p}{1 - \beta_p}} \frac{1}{r'}$ $\text{при } 1 \leq z \leq 1 + \lambda$ $\frac{I w_p}{D \ln \frac{1 + \beta_p}{1 - \beta_p}} \frac{1}{r'} \frac{z^2}{r'}$ $\text{при } 0 < z' < 1$	$W_p = \frac{\mu_0}{2} \frac{(I w)^2}{\alpha_p^3} \frac{\pi D}{4} \times \frac{1}{\ln \frac{1 + \beta_p}{1 - \beta_p}} \approx \frac{\mu_0}{2} \frac{(I w)^2}{\alpha_p^3} \frac{\pi D}{4} \times \frac{1}{3\beta_p}$	$P_{в,p} = \frac{\mu_0 \omega^2}{12p} a_{oc}^2 \times k_{об} W_{м,p} \frac{1}{1 + 3\lambda}$	$P_{oc} = \frac{\mu_0}{2} (I w_p)^2 \times \frac{\pi}{4\beta_p} = \frac{w_p}{D} \times \frac{1}{\alpha_p (1 + 3\lambda)}$

Примечание. W_m — энергия магнитного поля при максимальном токе; a_p, a_{oc} — радиальный и осевой размеры провода; P_p, P_{oc} — радиальное и осевое уси-
 лия; $(I w)_{oc}$ — МДС систем осевого и радиального магнитных полей; $\omega = 314$ рад/с.

зации массы $c_{об} = c_{ст} = 1$. При оптимизации годовых затрат

$$c_{об} = Z_{изг,об} + Z_p \rho_{об} J^2 k_{роб} / \gamma_{об};$$

$$c_{ст} = Z_{изг,ст} + Z_p \rho_{ст} (B_m f) k_{рст},$$

где $Z_{изг}$ и Z_p — удельные годовые затраты на изготовление и покрытие потерь в стали и обмотке; J и B_m — плотность тока (действующее значение) и максимальная индукция в стали магнитопровода в расчетном режиме; $\rho_{об}$ и $\gamma_{об}$ — удельные сопротивление и плотность материала обмотки; $\rho_{ст}$ — удельные потери при индукции B_m и частоте f ; $k_{рст}$ — коэффициент добавочных потерь в стали; $k_{роб}$ — коэффициент добавочных потерь в меди.

Целевая функция N является сложной функцией размеров реактора и нагрузки активных материалов. Для определения оптимальных размеров производится исследование целевой функции N на минимум. Поскольку N является функцией параметров α и β , то

$$\frac{\partial N}{\partial \alpha} = 0 \text{ и } \frac{\partial N}{\partial \beta} = 0.$$

Ввиду того что уравнения, определяющие минимум функции N , аналитически не решаются, найдена зависимость параметров α_0 и β_0 от m_N , где α_0 и β_0 — относительные оптимальные размеры, а m_N — параметр уравнений оптимальности:

$$m_N = \frac{c_{ст} \gamma_{ст} k_{ст}^{b_2 - b_1} \mu_0^{c_2 - c_1} J^{d_2 - d_1}}{c_{об} \gamma_{об} k_{об}^{a_2 - a_1} B_m^{l_1 - l_2}} \times \left(\frac{I_m}{I} \right)^{f_2 - f_1} W_m^{g_2 - g_1},$$

a_1, a_2 — g_1, g_2 — показатели степени в исходных уравнениях электромагнитного расчета (табл. 21.31). Так, для броневое реактора $a_2 - a_1 = 0,4$; $c_2 - c_1 = 0,8$; $b_2 - b_1 = 0$; $d_2 - d_1 = 0,6$; $e_1 - e_2 = 1$ и т. д.

В этой таблице приведены также уравнения, позволяющие найти оптимальные соотношения α_0 и β_0 . Зависимости оптимальных соотношений основных размеров и оптимальных геометрических факторов для однофазных реакторов от параметра m_N приведены на рис. 21.22. На этих рисунках F_{D0} — безразмерный геометрический фактор диаметра; $F_{(гоб)0}$ — безразмерный геометрический фактор массы обмотки; $F_{(гст)0}$ — безразмерный геометрический фактор массы магнитопровода. Определив с помощью табл. 21.31 m_N , значения α_0 , β_0 , F_{D0} , $F_{(гоб)0}$, $F_{(гст)0}$ найдем с помощью рис. 21.22. После этого можно найти $H_{об}$ и $D_{об}$, массу обмотки, массу магнитопровода, потери и годовые затраты.

Для выбора и расчета оптимальных параметров стержневых безъярмовых реакторов (табл. 21.31) рекомендуется использовать методику, разработанную в [21.30].

При расчете параметра m_N значения электромагнитных нагрузок и ряда вспомогательных коэффициентов берутся исходя из параметров аналогичных существующих реакторов.

Допустим, необходимо рассчитать и оценить технико-экономические показатели компенсирующего реактора для стабилизированного преобразователя частоты 50/400 мощностью 200 кВ·А, индуктивность

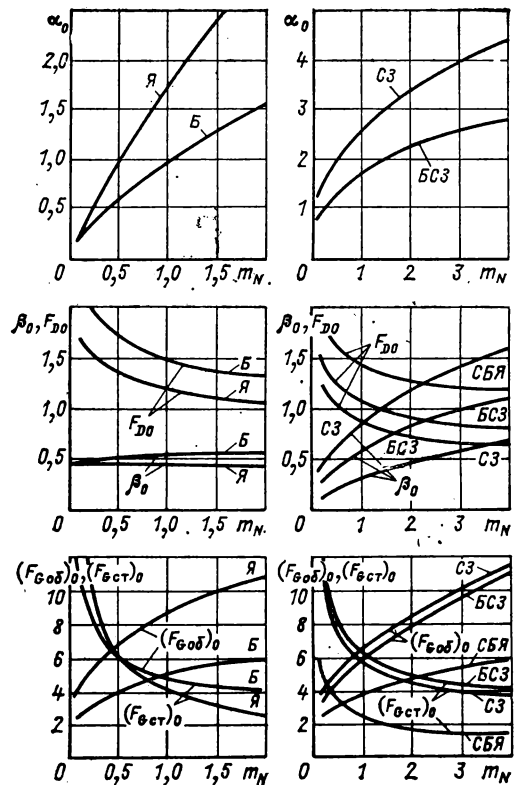


Рис. 21.22. Зависимость оптимальных соотношений основных размеров и оптимальных геометрических факторов однофазных реакторов от параметра m_N . Б — броневые реакторы; Я — ярмовые; БСЗ — бронестержневые с зазорами; СЗ — стержневые с зазорами; БСЯ — реакторы со стержнями без ярма

реактора $L = 0,125$ Гн, ток 515 А, частота 400 Гц. При проектировании может быть принято: материал обмотки — медь, $\gamma_{об} = 8900$ кг/м³, $\rho_{об} = 2,4 \cdot 10^{-12}$ Ом·м (при температуре 115 °С), $\rho_{об} / \gamma_{об} = 2,7 \cdot 10^{-12}$ Ом·м³/кг; материал магнитопровода — сталь 1521, толщина 0,2 мм, $\gamma_{ст} = 7550$ кг/м³, $Z_{изг,об} = 0,3$ руб/(кг·год), $Z_{изг,ст} = 0,15$ руб/(кг·год), $Z_p = 0,03$ руб/(Вт·год). Вид конструкции — стержневая с зазорами.

Значения электромагнитных нагрузок и ряда коэффициентов заимствуются из технического проекта сухого однофазного трансформатора типа ОВ10-0,4, работающего на частоте 400 Гц, и сглаживающего реактора типа ФРОС 125/0,5 [21.24]: $J = 1,24 \cdot 10^6$ А/м²; $B_m = 0,4$ Тл; $\rho_{ст} = 2,4$ Вт/кг; $k_{рст} = 1,1$; $k_{роб} = 1,3$; $k_{ст} = 0,74$; $k_{об} = 0,2$; $k_{\psi} = 1,1$ (коэффициент потокоцепления).

Порядок расчета реактора по минимальным годовым затратам

$$m_w = \frac{c_{ст} \gamma_{ст} k_{ст}}{c_{об} \gamma_{об} k_{об}} = \frac{Z_{изг,ст} + Z_p \rho_{ст} (B_m f) k_{рст}}{Z_{изг,об} + Z_p \rho_{об} J^2 k_{роб} / \gamma_{об}} = 1,56.$$

По рис. 21.22 находим: $\alpha_0 = 3,1$; $\beta_0 = 1,0$; $F_{D0} = 0,8$; $F_{(гоб)0} = 7,5$; $F_{(гст)0} = 4,9$.

Определяем

$$A = \frac{G_{об}}{F_{(G_{об})о}} = \gamma_{об} k_{об}^{0,25} k_{ст}^{-0,75} \times$$

$$\times \left(\frac{L I_m I}{B_m J k_{\psi}} \right)^{-0,75} = 6,8 \text{ кг};$$

$$G_{акт} = G_{об} + G_{ст} = \left[F_{(G_{об})о} + \right.$$

$$\left. + \frac{\gamma_{ст} k_{ст}}{\gamma_{об} k_{об}} F_{(G_{ст})о} \right] A = 155 \text{ кг};$$

$$P = \left[\frac{\rho_{об}}{\gamma_{об}} J^2 k_{об} F_{(G_{об})о} + \right.$$

$$\left. + \frac{\gamma_{ст} k_{ст}}{\gamma_{об} k_{об}} \rho_{ст} F_{(G_{ст})о} \right] A = 550 \text{ Вт};$$

$$Z_{г} = Z_{об} + Z_{п} \rho_{об} / \gamma_{об} J^2 k_{об} \times$$

$$\times [F_{(G_{об})о} + m_w F_{(G_{ст})о}] A = 47,4 \text{ руб/год}.$$

Для окончательного решения вопроса о выборе размеров производится расчет ряда вариантов методом перебора с детальным их расчетом и с использованием полученных значений α_0 и β_0 . После этого находится оптимальный вариант.

Очень часто приходится отходить от оптимальных соотношений. Для оценки отклонения от оптимальных соотношений удобны диаграммы избыточного расхода (рис. 21.23). Так, для реактора по рис. 21.23, а при колебании β/β_0 от 0,75 до 1,5 и α/α_0 от 0,7 до 1,5 избыточный расход меди составляет до 1 % по отношению к минимальному расходу.

В заключение следует указать, что $\alpha_0 = \beta_0 = 0,345$ для реактора без магнитопровода (см. рис. 21.19, а) справедливы лишь для отдельно расположенных реакторов. В трехфазном комплекте токоограничивающих реакторов появляются большие электродинамические усилия, действующие на опорные изоляторы. С целью уменьшения этих усилий необходимо реакторы делать вытянутыми вдоль оси. В этом случае также можно найти свои значения α_0 и β_0 , но в уравнении N необходимо учитывать электродинамические усилия между реакторами.

Таблица 21.31. Исходные уравнения, оптимальные соотношения размеров и формулы для оценки технико-экономических показателей однофазных реакторов с круглыми обмотками

	1. Без стали	2. Броневая	3. Ярмовая
Конструкция			
Независимые переменные	$\alpha = \frac{H_{об}}{D_{об}}; \quad \beta = \frac{b_{об}}{D_{об}}$	$\alpha = \frac{H_{ок}}{D_{об}}; \quad \beta = \frac{b_{об}}{D_{об}}$	$\alpha = \frac{H_{ок}}{D_{об}}; \quad \beta = \frac{b_{об}}{D_{об}}$
Исходные уравнения	$L = \mu_0 \omega^2 D \Phi(\alpha, \beta)$ $I\omega = J k_{об} \alpha \beta D^2$	$L = \mu_0 \omega^2 D \frac{\pi(1-\beta/3)^2}{4\alpha};$ $I\omega = J k_{об} \alpha \beta D^2;$ $S_{ст} = \frac{\mu_0 J}{B_m} \frac{I_m}{I} k_{об} \frac{\pi}{4} \beta D^2$	$L = \mu_0 \omega^2 D \frac{\pi(1-\beta/3)^2}{4\alpha};$ $I\omega = 2 J k_{об} \alpha \beta D^2;$ $S_{ст} = \frac{\mu_0 J I_m}{B_m I} k_{об} \frac{\pi}{4} \beta D^2$
Упрощения	$\Phi = \frac{\pi(1-\beta/3)^2}{4(\alpha+0,45)}$	$d_{отв} = 2(\alpha + \Delta)$	$\Delta_1 = 2\Delta_2$
D	$F_D k_{об}^{-0,4} (\mu_0 J^2)^{-0,2} (L I^2)^{0,2}$		
F_D	$(\alpha^2 \beta^2 \Phi)^{-0,2}$	$(4/\pi)^{0,2} [\alpha \beta^2 (1-\beta/3)^2]^{-0,2}$	$(2/\pi)^{0,2} [\alpha \beta^2 (1-\beta/3)^2]^{-0,2}$
G_об	$F_{G_{об}} k_{об}^{-0,2} \gamma_{об} (\mu_0 J^2)^{-0,6} (L I^2)^{0,6}$		
F_{G_{об}}	$\pi \alpha \beta F_D^3$		$2 \pi \alpha \beta F_D^3$
G_{ст}	—	$F_{G_{ст}} k_{об}^{-0,6} \mu_0 \frac{J}{B_m} \frac{I_m}{I} (\mu_0 I_m^2)^{-0,8} (L I^2)^{0,8}$	
F_{G_{ст}}	—	$\frac{\pi}{4} \beta (1 + \alpha + \beta) F_D^4$	$2 \pi \beta (1 + \beta) F_D^4$
m_w	—	$\frac{\gamma_{ст} c_{ст}}{\gamma_{об} c_{об}} k_{об}^{-0,4} \mu_0 \frac{J}{B_m} \frac{I_m}{I} (\mu_0 J^2)^{-0,2} (L I^2)^{0,2}$	

Продолжение табл. 21.31

Конструкция	4. Бронестержневая с зазором	5. Стержневая с зазором	6. Стержневая без ярем
Независимые переменные	$\alpha = \frac{H_{ок}}{D_{ст}}; \quad \beta = \frac{b_{ок}}{D_{ст}}$	$\alpha = \frac{H_{ок}}{D_{ст}}; \quad \beta = \frac{b_{ок}}{D_{ст}}$	$\alpha = \frac{H_{об}}{D_{ст}}; \quad \beta = \frac{b_{об}}{D_{ст}}$
Исходные уравнения	$L = (w B_m S_{ст} / I_m) k_{\psi};$ $I w = J k_{об} \alpha \beta D^2;$ $k_{\psi} = 1,05 \div 1,2$		$L = (w B_m S_{ст} / I_m) k_{\psi};$ $I w = J k_{об} \alpha \beta D^2;$ $k_{\psi} \approx 0,8 \div 0,9$
Упрощения	$\Delta_1 = \Delta_2; \quad h_{я} = \frac{D}{2};$ $S_{я} = S_{ст} / 2$	$\Delta_2 = 2 \Delta_1; \quad h_{я} = D;$ $S_{я} = S_{ст}$	$\Delta = 0$
D	$F_D k_{об}^{-0,25} k_{ст}^{-0,25} (J B_m k_{\psi})^{-0,25} (2 I / I_m)^{0,25} (L / I_m^2)^{0,25}$		
F_D	$(4 / \pi)^{0,25} (\alpha \beta)^{-0,25}$		
$G_{об}$	$F_{G_{об}} k_{об}^{-0,25} k_{ст}^{-0,75} \gamma_{об} (J B_m k_{\psi})^{-0,75} (2 I / I_m)^{0,75} \left(\frac{L I_m^2}{r} \right)^{0,75}$		
$F_{G_{об}}$	$\pi \alpha \beta (1 + \beta) F_D^3$	$(\pi / 2 \alpha) \beta (2 + \beta) F_D^3$	$\pi \alpha \beta (1 + \beta) F_D^3$
$G_{ст}$	$F_{G_{ст}} k_{об}^{-0,75} k_{ст}^{0,25} \gamma_{ст} (J B_m k_{\psi})^{-0,75} (2 I / I_m)^{0,75} (L / I_m^2)^{0,75}$		
$F_{G_{ст}}$	$\frac{\pi}{2} (1 + \alpha + \beta) F_D^3$	$\frac{\pi}{2} (1 + \alpha + \beta) F_D^2$	$\frac{\pi}{4} \alpha F_D^3$
m_w	$\frac{\gamma_{ст} c_{ст} k_{ст}}{\gamma_{об} c_{об} k_{об}}$		

Примечания: 1. Общие допущения: коэффициенты заполнения $k_{об} = \text{const}$ и $k_{ст} = \text{const}$.

2. Основные размеры: D — средний диаметр обмотки (виды конструкции 1—3), диаметр стержня магнитопровода (виды 4—6); H — высота обмотки (виды 1, 6); высота окна магнитопровода (виды 2—5); b — радиальный размер обмотки (виды 1—3), ширина окна (виды 4, 5), радиальный размер обмотки вместе с промежутком между обмоткой и описанной окружностью стержня (вид 6).

Коэффициенты заполнения: $k_{ст} = 4 S_{ст} / \pi D_{ст}^2$;

$D = D_{ст}$; $k_{об} = S_{пр} / b_{об} H_{об}$ (виды 1, 6); $k_{об} = S_{пр} / b_{об} H_{об}$ (виды 2, 3); $k_{об} = S_{пр} / b_{об} H_{об}$ (вид 4 и для однофазного реактора — вид 5); $S_{ст}$,

$S_{я}$ — активное сечение стали стержня и ярма; $S_{пр} = S_{пр} n w$ — суммарное сечение проводов одной обмотки (виды 1—4, 6) или $S_{пр} = 2 S_{пр} n w$ — двух обмоток в одном окне (вид 5), где $S_{пр}$ — сечение провода; w — число витков одной обмотки; n — число параллельных проводов; k_{ψ} — коэффициент потокоосцепления — отношение полного потокоосцепления обмотки (с учетом потоков в воздухе) к потокоосцеплению, определяемому потоками в магнитопроводе. Оптимальные соотношения в зависимости от m_w приведены на рис. 21.22. Для трехфазных реакторов в выражение $F_{G_{об}}$ для видов 3 и 5 войдет дополнительно множитель $3/2$, а для вида 4 — множитель 3; для видов 3—5 существенно изменяется выражение в скобках в формулах $F_{G_{ст}}$ и немного изменяются оптимальные соотношения [21.25].

Т а б л и ц а 21.32. Нормированные испытательные напряжения реакторов с нормальной изоляцией, кВ (ГОСТ 1516.1-78)

Класс напряжения, кВ	Напряжения грозовых импульсов								Напряжение коммутационного импульса внешней шунтирующих реакторов				Кратковременные напряжения промышленной частоты				Длительное напряжение промышленной частоты для испытания внутренней изоляции шунтирующих реакторов
	для испытания внутренней изоляции реакторов				для испытания внешней изоляции реакторов												
	шунтирующих		токоограничивающих и дугогасящих		шунтирующих		токоограничивающих и дугогасящих		шунтирующих и дугогасящих		токоограничивающих и дугогасящих						
	полный импульс		срезанный им-пульс		полный импульс		срезанный им-пульс		относительно земли и других обмоток		между фазами		относительно земли		между фазами		
	полный импульс	срезанный им-пульс	полный импульс	срезанный им-пульс	полный импульс	срезанный им-пульс	полный импульс	срезанный им-пульс	полный импульс	срезанный им-пульс	полный импульс	срезанный им-пульс	полный импульс	срезанный им-пульс	полный импульс	срезанный им-пульс	
3	44	50	54	50	42	50	42	50	—	—	18	—	24	—	26	—	—
6	60	70	60	70	57	70	57	70	—	—	25	—	32	—	34	—	—
10	80	90	80	90	75	90	75	90	—	—	35	—	42	—	45	—	—
15	108	120	108	120	100	120	100	120	—	—	45	—	55	—	60	—	—
20	130	150	130	150	120	150	120	150	—	—	55	—	65	—	70	—	—
24	—	—	150	175	—	—	140	175	—	—	65	—	75	—	80	—	—
27	—	—	170	200	—	—	160	200	—	—	70	—	80	—	90	—	—
35	200	225	200	230	185	230	185	230	—	—	85	—	95	—	105	—	—
110	480	550	480	550	460	570	460	570	—	—	200	200	200	200	280	280	—
150	550	600	660	760	500	625	630	765	—	—	230	275	275	415	320	355	—
220	750	835	950	1090	690	860	900	1130	—	—	325	400	400	600	465	520	—
330	1200	1300	—	—	1150	1350	—	—	950	—	460	575	—	875	670	—	—
500	1675	1800	—	—	1600	1950	—	—	1300	—	630	830	—	1250	900	—	350

1 Для трехфазных реакторов.

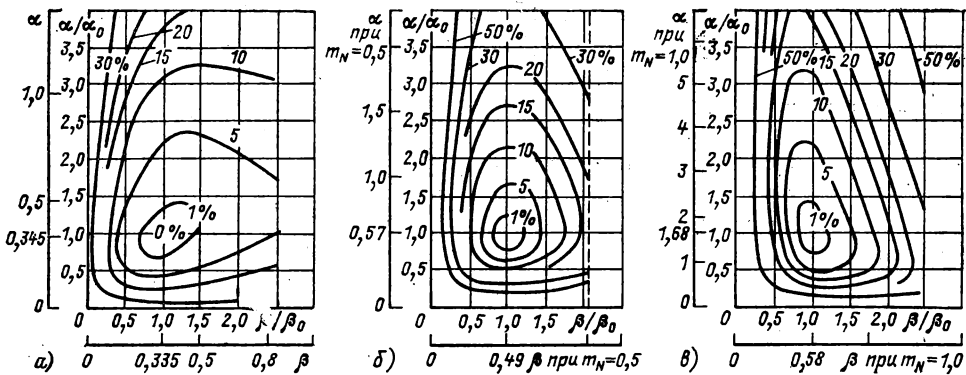


Рис. 21.23. Диаграммы избыточного расхода оптимизируемого параметра:

а — реактор без стали (диаграммы Хака); б — броневые и ямные реакторы; в — бронестержневые и стержневые реакторы с зазорами

Испытательные напряжения высоковольтных реакторов даны в табл. 21.32.

Требования по безопасности масляных реакторов определяются ГОСТ 12.2.007.0-75 [21.27] и ГОСТ 12.2.007.2-75 [21.29].

Выбор основных размеров и расчет бетонных токоограничивающих реакторов

Основные обозначения

- $x_{\text{ном}}\%$ — реактивное сопротивление, %;
 $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток реактора, А;
 $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение реактора, кВ;
 $x_{\text{ном}}$ — индуктивное сопротивление реактора, Ом;
 L — индуктивность реактора, Гн;
 f — частота сети, Гц;
 ω — угловая частота сети, рад/с;
 Q — реактивная мощность трехфазного комплекта реакторов, квар;
 Δu — потеря напряжения, %;
 I_k — расчетный ток короткого замыкания, А;
 t_k — время термической стойкости, А;
 D — средний диаметр реактора, м;
 h — высота обмотки реактора, м;
 H — высота реактора без изоляторов, м;
 b — толщина обмотки реактора, м;
 n — число электрических витков;
 m — число параллельных ветвей;
 l — расстояние между осями реакторов при горизонтальном расположении фаз, м;
 G — масса фазы реактора, кг;
 P — максимальное значение силы взаимодействия между реакторами, Н. Если потоки реакторов совпадают, то реакторы притягиваются; если потоки направлены встречно, то реакторы отталкиваются;
 $P_{\text{отт}}$ — максимальное значение отталкивающей силы, Н;
 $P_{\text{прит}}$ — максимальное значение притягивающей силы, Н;
 p_p — растягивающее усилие на один изолятор;
 p_c — сжимающее усилие на один изолятор.

Основные соотношения

Индуктивное сопротивление, %,

$$x_{\text{ном}}\% = \frac{I_{\text{ном}} x_{\text{ном}} \sqrt{3}}{10 U_{\text{ном}}}$$

Индуктивность, Гн,

$$L = \frac{10 U_{\text{ном}} x_{\text{ном}}\%}{I_{\text{ном}} 2\pi f \sqrt{3}}$$

Пропускная способность реактора на три фазы, квар,

$$Q = 3 I_{\text{ном}}^2 x_{\text{ном}} \cdot 10^{-3}.$$

Потеря напряжения на реакторе

$$\Delta u\% = x_{\text{ном}}\% \sin \varphi,$$

где φ — угол сдвига фаз между током и фазным напряжением за реактором.

Расчетный ток короткого замыкания за реактором

$$I_k = \frac{100}{x_{\text{ном}}\%} I_{\text{ном}};$$

при $x_{\text{ном}} = 3\%$ приближенно $I_k = 33,3 I_{\text{ном}}$.

Для точного расчета I_k в этом случае необходимо учесть сопротивление цепи до реактора.

При расчетах электродинамических сил принимаем

$$i_y = 1,8 \sqrt{2} I_k.$$

Конструкции реакторов

Дисковые реакторы выполняются с $I_{\text{ном}} = 25 \div 100$ А; $U_{\text{ном}} = 3 \div 10$ кВ.

Бетонные реакторы выполняются с $I_{\text{ном}} = 150 \div 4000$ А; $U_{\text{ном}} \leq 30$ кВ.

В настоящее время благодаря высокому качеству изоляции бетонные реакторы используются не только в закрытых, но и в открытых распределительных устройствах.

Масляные реакторы выполняются с $I_{\text{ном}} = 200 \div 1000$ А; $U_{\text{ном}} \geq 35$ кВ. При $U_{\text{ном}} = 35$ кВ три фазы масляного реактора размещаются в одном баке. При $U_{\text{ном}} = 35$ кВ каждая фаза размещается в отдельном баке.

Сдвоенный реактор представляет собой единую обмотку со средним выводом, рассчитанным на суммарный ток ветвей. Этот вывод присоединяется к сборным шинам, а концы обмоток — к нагрузке ветвей.

Расчет токоограничивающего реактора

Задано: $U_{\text{ном}}$; $I_{\text{ном}}$; $x_{\text{ном}}$ %; t_k .

Выбор сечения провода q , мм², производится по ориентировочной плотности тока J , А/мм², согласно табл. 21.33. Выбор сечения кабелей для бетонных реакторов производится по табл. 21.34.

При $q > 185$ мм² обмотка выполняется из нескольких параллельных ветвей с применением транспонирования (рис. 21.24).

Таблица 21.33. Ориентировочная плотность тока в обмотках реактора из меди при длительной нагрузке

Конструкция реактора	J , А/мм ²
Реакторы на токи до 100 А с дисковой обмоткой и воздушным охлаждением	1,2—1,8
Реакторы на токи от 150 до 3000 А с кабельной обмоткой и воздушным охлаждением	2—2,7
Реакторы на токи от 200 до 1000 А с масляным охлаждением	3—3,5

Таблица 21.34. Номинальные поперечные сечения кабелей с медными жилами для бетонных реакторов

I , А	150	200	300	400	500	600	700	1000	1500
q , мм ²	70	95	120	185	1×210, 2×120	2×120, 2×135, 2×150	2×150, 3×185	3×135, 3×150	4×150, 4×185

Ориентировочная плотность тока для реакторов с алюминиевой обмоткой 0,8—1,1 А/мм², меньшие значения соответствуют реакторам на больший номинальный ток.

Выбор размеров реактора

Расположение витков в реакторе и его основные размеры показаны на рис. 21.24, а. Для реактора в виде многослойной цилиндрической катушки

$$h = (r - 1)c; \quad b = (k - 1)a.$$

Здесь r — число рядов. Расстояние между рядами c обычно $4,5 \cdot 10^{-2}$ м. Число витков в горизонтальном ряду k . Расстояние между соседними витками ряда a обычно $3,5 \cdot 10^{-2}$ м. Задавшись D , м, по рис. 21.25 находим r и k , а по ним h и b .

При m параллельных ветвях на оси ординат следует откладывать $m^2 L$.

Проверка L , мГн, для реактора с выбранными размерами:

$$L = 10,5 n^2 D \left[\frac{D}{2(b+h)} \right]^p \cdot 10^{-4};$$

$$p = 3/4 \text{ при } 0,3 \leq \frac{D}{2(b+h)} \leq 1;$$

$$p = 1/2 \text{ при } 1 \leq \frac{D}{2(b+h)} \leq 3.$$

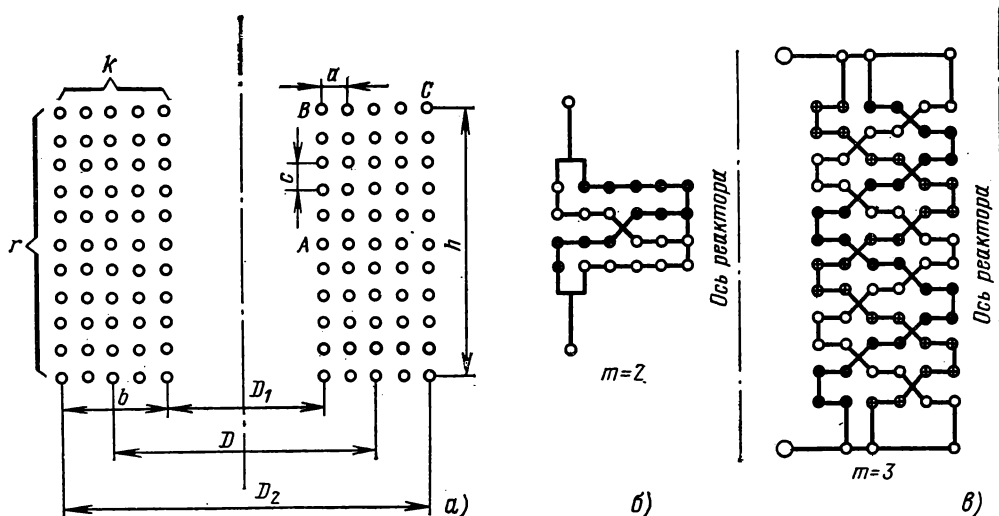


Рис. 21.24. Расположение проводов обмотки при различных числах параллельных ветвей:

a — одна параллельная ветвь; b — две ветви; c — три ветви

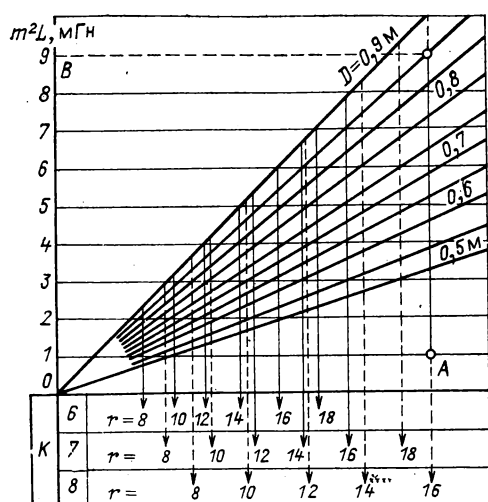


Рис. 21.25. Диаграмма для выбора основных параметров обмотки реактора

При m параллельных ветвях $n = \frac{kr}{m}$.

Коэффициент излишка меди k_m следует проверить по кривым рис. 21.23; k_m не должен превышать 105 %.

Для дискового реактора индуктивность, мГн,

$$L = n^2 \lambda_1 D \cdot 10^{-4},$$

где $\lambda_1 = f(b/D)$ по рис. 21.26.

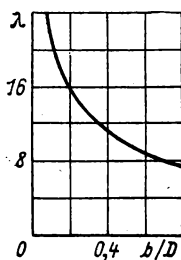


Рис. 21.26. Кривая для вычисления индуктивности дискового реактора

Для реактора в виде тонкого цилиндра индуктивность, мГн,

$$L = n^2 \lambda_2 D \cdot 10^{-4},$$

зависимость $\lambda_2 = f(h/D)$ дана в табл. 21.35.

Допускается отклонение индуктивности от требуемого значения ± 10 %.

Таблица 21.35. Значения коэффициента λ_2 в функции отношения h/D

h/D	λ_2	h/D	λ_2	h/D	λ_2
0,10	20,10	0,70	8,61	1,6	4,82
0,20	15,80	0,80	7,88	1,8	4,42
0,30	13,35	0,85	7,52	2,2	3,73
0,40	11,62	0,90	7,25	2,6	3,25
0,45	11,00	1,0	6,87	3,0	2,87
0,50	10,35	1,2	5,96	3,5	2,50
0,60	9,40	1,4	5,33		

Потери в реакторе и нагрев его при номинальном режиме (применительно к бетонным реакторам)

$$\Delta P = k_d I_{\text{ном}}^2 R; \quad R = \rho_{75} \cdot 1,03 \pi D n / m q;$$

$$k_d = 1 + k_0 k_q k_p \left(\frac{m n}{h} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right) \cdot 10^{-3},$$

k_0 берется в табл. 21.36; $k_q = (1,15 \div 1,5) \cdot 10^{-2} q$; q — в мм²; $k_p = 1$ для меди, $k_p = 0,37$ для алюминия; ρ — в мкОм·м при 75 °С.

Превышение температуры для отдельно стоящей фазы бетонного реактора с обмоткой из медного кабеля

$$\tau = 80 k_t \left(\frac{I_{\text{ном}}}{m C_H} \right)^2,$$

где

$$k_t = 0,57 \frac{D_i}{D_i - 2, 1N}; \quad D_i = D - b,$$

N — число колонн.

Коэффициент C_H берется по табл. 21.37.

Для верхней фазы трехфазного реактора с вертикальным расположением фаз

$$\tau = 100 k_t \left(\frac{I_{\text{ном}}}{m C_H} \right)^2.$$

При температуре окружающей среды 35 °С допускается для малых реакторов $\tau = 65$ °С, для больших $\tau = 85$ °С.

При определении полных потерь следует к потерям в обмотке добавить потери в бетоне (около 0,1 ΔP) и потери во фланцах изоляторов. По данным [21.33] потери на один

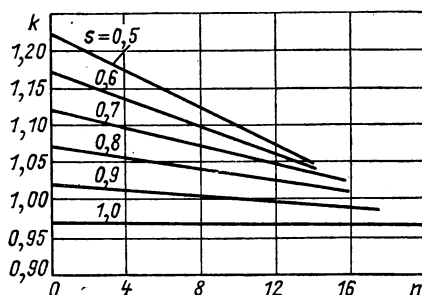


Рис. 21.27. Допустимые перегрузки и зависимости от суточного графика:

n — продолжительность максимума, ч; $s = I_{\text{ср,с}} / I_{\text{max}}$ ($I_{\text{ср,с}}$ — средний суточный ток; I_{max} — максимальный суточный ток)

изолятор составляют 15 Вт. Реактор некоторое время можно нагрузить током большим, чем номинальный. Кратность $k = I_{\text{перегр}} / I_{\text{ном}}$ может быть найдена с помощью рис. 21.27.

Электродинамическая и термическая стойкость реактора

Усилие на 1 м витка в наиболее нагруженном месте (точка B на рис. 21.24,а), Н/м,

$$p = 6 \frac{n}{m b} \left(\frac{I_{\text{ном}}}{x_{\text{ном}} \%} \right)^2 A_h,$$

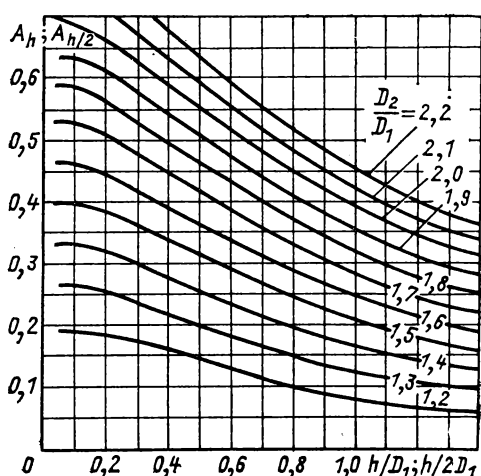


Рис. 21.28. Диаграмма для определения сил, действующих на витки обмотки ($D_2=D+b$)

где A_h определяется по кривым рис. 21.28. Напряжение на разрыв в материале провода для меди

$$\sigma = \sqrt[3]{\frac{\rho^2 l^2 E}{6 \cdot 10^{-12} q^2}} \leq 150 \text{ МПа},$$

где l — длина пролета провода между колоннами для наружного витка, м; $E=11,5 \cdot 10^{10}$ Па — модуль упругости; q — сечение кабеля, мм².

Если $\sigma > 150$ МПа, то необходимо уменьшить l , увеличив число колонн N . Для алюминия $\sigma \leq 6,5$ МПа; $E=5,4 \cdot 10^{10}$ Па.

Проверка прочности колонн
Усилие, передаваемое одним витком на одну колонну,

$$p_k = \frac{\rho_m \sin \beta}{k-1} (k-M) [D_1 + (M-1) \Delta D] - \frac{\sum_{M=1}^k \frac{\rho_m \sin \beta}{k-1} [D_1 + (M-1) \Delta D] (k-M)}{[D_1 + (M-1) \Delta D] \sum_{M=1}^k \frac{1}{D_1 + (M-1) \Delta D}},$$

где ρ_m — усилие на 1 м, действующее на внутренний виток, расположенный в середине высоты реактора (точка А на рис. 21.24,а), Н/м:

$$\rho_m = 5 \frac{n}{mb} \left(\frac{I_{\text{ном}}}{x_{\text{ном}} \%} \right)^2 A_{h/2}$$

(где $A_{h/2}$ находят по рис. 21.28); 2β — угол, приходящийся на одну колонну, равный $2\pi/N$; k — число витков в ряду; M — номер витка в ряду ($M=1$ для внутреннего витка); ΔD — увеличение диаметра при переходе от витка к витку.

Наибольшее усилие смятия создает наружный виток.

Таблица 21.36. Коэффициент k_0 для провода круглого сечения в функции от h/D и b/D

b/D	h/D									
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
0,2	28,5	32,5	36,0	33,5	41,0	43,4	45,5	47,2	49,0	50,5
0,3	22,8	26,3	30,0	33,0	36,0	38,0	40,0	41,5	43,0	44,4
0,4	19,2	23,0	26,0	28,5	31,0	33,2	35,0	37,0	38,3	39,8
0,5	15,3	21,8	21,8	24,3	26,5	29,0	31,0	32,8	34,2	35,8

Таблица 21.37. Коэффициент C_H для расчета нагрева бетонных реакторов

Сечение провода, мм ²	При числе рядов обмотки в осевом направлении										
	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Медный провод											
70	270	264	258	253	248	243	239	235	231	228	225
95	337	329	322	315	309	303	298	295	289	285	282
120	400	390	381	373	365	358	252	346	341	337	333
135	438	426	415	406	398	391	384	378	373	368	364
150	475	463	452	442	433	424	416	409	403	398	393
165	555	541	528	516	505	495	486	478	471	464	458
210	608	591	576	563	551	540	530	521	512	506	505
Алюминиевый провод											
120	297	290	284	278	272	267	263	259	—	—	—
135	324	316	309	303	297	291	287	283	—	—	—
150	350	341	334	327	320	314	309	305	—	—	—
173	388	378	370	362	354	347	341	336	—	—	—
186	408	397	388	380	372	365	358	352	346	340	335
210	450	438	427	418	410	402	396	390	384	379	374
240	498	486	474	464	454	444	436	429	422	416	410

Напряжение на изгиб в бетоне

$$\sigma = \frac{0,2h^2}{24cW} \sum_{M=1}^k \frac{\rho_m \sin \beta}{k-1} [D_1 + (M-1)\Delta D] (k-M),$$

где W — момент сопротивления изгибу колонны, м^3 .

Время термической стойкости для алюминия $t_k = 4700/J_k^2$, для меди $t_k = 11\,000/J_k^2$.

Расчет электродинамических сил между реакторами и проверка изоляторов

Максимальное значение притягивающей (отталкивающей) силы между двумя вертикально расположенными реакторами

$$P = (i_y n)^2 \psi_B,$$

где ψ_B определяют по кривым рис. 21.29, а.

Для крайней фазы трехфазного комплекта при «вывернутой» средней фазе (влиянием третьей фазы пренебрегаем)

$$P_{\text{отт}} = \frac{1}{4} (i_y n)^2 \psi_B; \quad P_{\text{прит}} = \frac{3}{4} (i_y n)^2 \psi_B;$$

$$p_p = \frac{P_{\text{отт}}}{N} - \frac{10G}{N}; \quad p_{сж} = \frac{P_{\text{прит}}}{N} + \frac{10G}{N}.$$

Для дисковых реакторов с $h/D < 0,5$

$$P = i_y^2 \frac{dM}{dx}; \quad \frac{dM}{dx} = \frac{h}{b+h+D} \theta,$$

где θ находим по кривой на рис. 21.30.

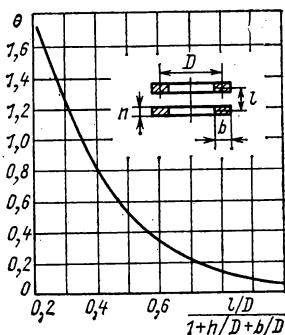


Рис. 21.30. Зависимость $\theta = f\left(\frac{l/D}{1+h/D+b/D}\right)$

При горизонтальном расположении реакторов

$$P = (i_y n)^2 \psi_r,$$

где ψ определяют по кривым рис. 21.30, б.

Горизонтальное расположение реакторов применяется либо при больших электродинамических силах, либо при малой высоте помещения. При горизонтальном расположении реакторов (рис. 21.31) часть изоляторов подвергается воздействию растягивающей силы p_{p1} , p_{p2} , часть — воздействию сжимающей $p_{с1}$ и $p_{с2}$.

На фланец каждого изолятора действует также изгибающая сила $p_{изг}$. Выбор расстоя-

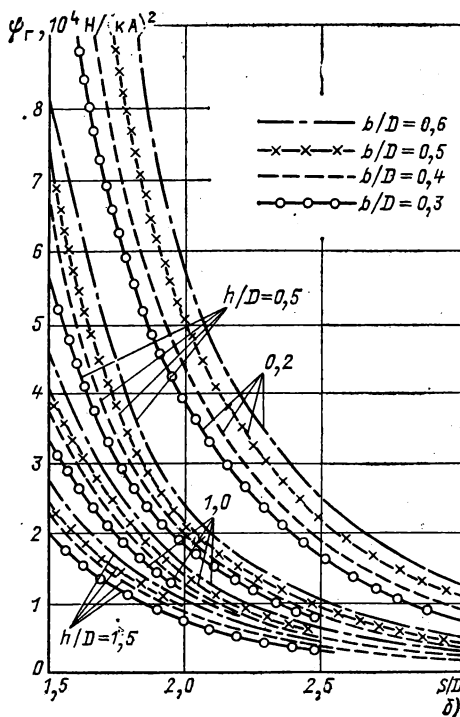
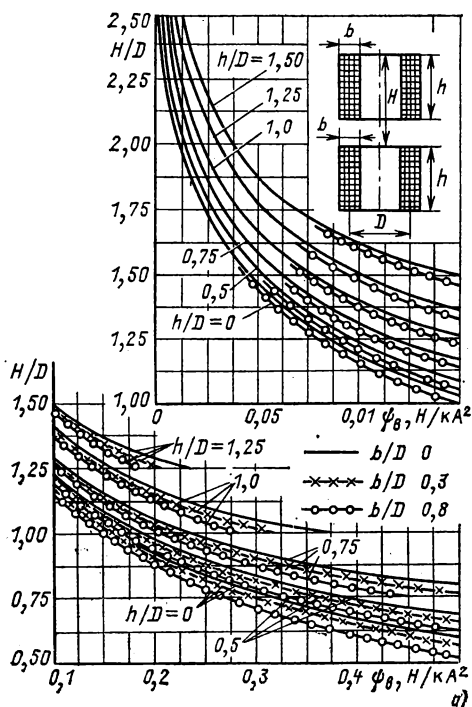


Рис. 21.29. Зависимости ψ_B , ψ_r от H/D и S/D (S — расстояние между осями горизонтально расположенных реакторов)

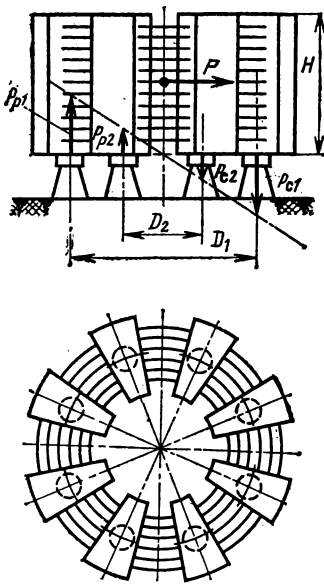


Рис. 21.31. Расчетная схема для определения сил, действующих на изоляторы

ния между реакторами производится по наибольшей силе (\$P_p\$ или \$P_{пзг}\$).

Наибольшее растягивающее усилие на изолятор

$$P_p = P_{p1} - 10G/N,$$

где \$P_{p1}\$ определяем для каждого частного случая, приравняв опрокидывающий момент \$PH/2\$ моменту, развиваемому силами, действующими на изоляторы. Считаем эти силы пропорциональными их плечам. Для \$N=8\$ (рис. 21.31)

$$\frac{P_{p1}}{P_{p2}} = \frac{D_1}{D_2}; \quad P_{p1} D_1 + P_{p2} D_2 = PH/2;$$

$$P_{p1} = \frac{PH}{2(D_1 + D_2^2/D_1)},$$

где \$H\$ — высота реактора с учетом бетона.

Сдвоенные реакторы

Сдвоенный реактор имеет две ветви, намотанные согласно. Схемы включения показаны на рис. 21.32. Источник питания присоединен к точке 3, нагрузки — к точкам 1 и 2. В нормальном режиме токи в ветвях направлены встречно. Падение напряжения на ветви 1 (без учета активного сопротивления обмотки) равно

$$\Delta U_1 = I_1 x_{0,5} - I_2 x_M,$$

где \$I_1\$ и \$I_2\$ — токи в ветвях; \$x_{0,5}\$ — реактивное сопротивление ветви; \$x_M = \omega M\$ — реактивное сопротивление взаимной индукции ветвей.

Эквивалентные сопротивления ветвей:

$$x_1 = \frac{\Delta U_1}{I_1} = x_{0,5} - \frac{I_2}{I_1} x_M \text{ для первой ветви;}$$

$$x_2 = \frac{\Delta U_2}{I_2} = x_{0,5} - \frac{I_1}{I_2} x_M \text{ для второй ветви.}$$

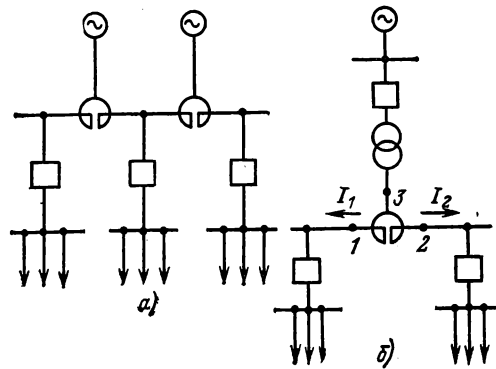


Рис. 21.32. Схемы включения сдвоенных реакторов: а — секционных; б — группового

Если \$I_1 = I_2\$, то \$x_1 = x_2 = x_{0,5} - x_M =

$$= x_{0,5} \left(1 - \frac{x_M}{x_{0,5}} \right) = x_{0,5} (1 - k).$$

В качестве номинального тока \$I_{ном}\$ сдвоенного реактора принимается номинальный ток ветви. Номинальное реактивное сопротивление сдвоенного реактора равно сопротивлению одной ветви:

$$x_{ном} \% = \frac{I_{ном} x_{0,5} \sqrt{3}}{10U_{ном}}.$$

Одной из основных характеристик сдвоенного реактора является коэффициент связи

$$k = \frac{x_M}{x_{0,5}} = \frac{M}{L_{0,5}}.$$

Сдвоенный реактор позволяет уменьшить падение напряжения в номинальном режиме и сократить габариты распределительного устройства.

Различают три режима работы сдвоенных реакторов. Режим № 1 — ток короткого замыкания протекает в ветви 2. В ветви 1 течет номинальный ток или ток отсутствует. В этом случае в обмотке ветви 1 наводится дополнительная ЭДС от потока взаимной индукции от ветви 2:

$$U_{навод} = I_{к2} \omega M.$$

Ток короткого замыкания определяется реактивным сопротивлением ветви \$x_{0,5}\$.

В режиме № 2 ветви обтекаются токами одного направления. При этом падение напряжения в ветви

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = I_1 x_{0,5} + I_2 x_M = I_1 (x_{0,5} + x_M).$$

В режиме № 3 токи короткого замыкания имеют направления согласно рис. 21.33

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = I_{к} (x_{0,5} - x_M).$$

Реактивное сопротивление ветви реактора \$x_{0,5c}\$ в режиме № 2 (согласное включение)

$$x_{0,5c} = x_{0,5} (1 + k).$$

В режиме № 3 (встречное включение)

$$x_{0,5в} = x_{0,5} (1 - k).$$

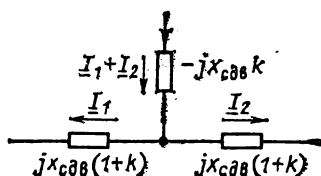


Рис. 21.33. Эквивалентная электрическая схема сдвоенного реактора

В большинстве случаев $k=0,4 \div 0,6$ и ограничивается как электродинамической стойкостью реактора, так и ЭДС, наведенной в холостой ветви в режиме № 1.

Эквивалентная электрическая схема сдвоенного реактора представлена на рис. 21.33.

Наиболее тяжелый режим в отношении электродинамической стойкости имеет место в случае № 3. Токи в ветвях протекают встречно, и ветви отталкиваются друг от друга.

Усилие между ветвями равно

$$P = i_{y1} i_{y2} \omega^2 \psi_0,$$

где i_{y1} и i_{y2} — ударные токи короткого замыкания в ветвях, кА; ω — число витков в ветви; ψ_0 — коэффициент, Н/(кА)² (рис. 21.34). На этом рисунке $\gamma = b/D$ — относительная толщина обмотки; $\alpha = h/D$ — относительная высота обмотки.

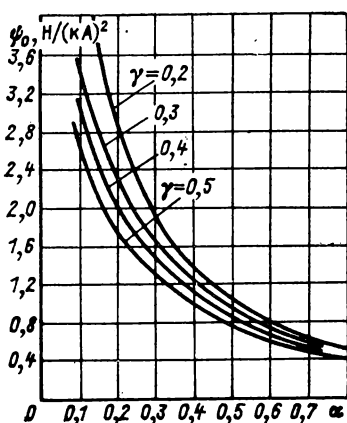


Рис. 21.34. Коэффициент ψ_0 для определения усилий при расчете электродинамической стойкости сдвоенных реакторов при встречных токах

Электродинамическая стойкость определяется уравнением

$$\sqrt{i_{y1} i_{y2}} \leq \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{\sigma_p N \theta}{\psi_0}},$$

где σ_p — допускаемое напряжение на разрыв для бетона (10^6 Па); N — число колонн; θ — площадь поперечного сечения колонны за вычетом площади, занимаемой проводом.

Наибольшие усилия действуют на витки первых 4—5 рядов обмотки (начиная от середины реактора). Для повышения динамической стойкости реактора ближайшие витки ветвей (первые 4—5 рядов) стягиваются

стеклянной лентой. В ряде случаев приходится применять высокопрочный бетон или специальные стяжные болты. Электродинамическая стойкость реактора в режиме № 3 почти в 2 раза меньше, чем при коротком замыкании в одной ветви (режим № 1).

Реакторы, выпускаемые в СССР

Для ограничения токов короткого замыкания в электроустановках 6 и 10 кВ применяются бетонные реакторы (рис. 21.35) с алюминиевой обмоткой серий РБ (одинарные) и РБС (сдвоенные), которые могут иметь естественное воздушное или принудительное (буква Д в маркировке типа) охлаждение.

Особенности способа монтажа трехфазного комплекта обозначаются буквами: Ст — ступенчатая установка фаз (рис. 21.36), Г — горизонтальная установка фаз. Отсутствие этих букв означает, что реактор предназначен для вертикальной установки фаз. Технические данные бетонных реакторов приведены в табл. 21.38, 21.39.

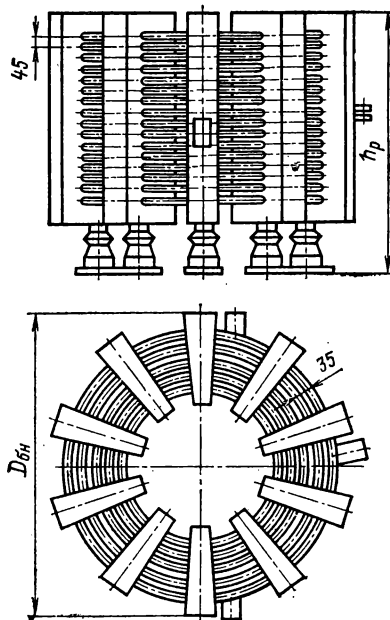


Рис. 21.35. Бетонный реактор

В цифровом обозначении первое число — номинальное напряжение, кВ; второе — номинальный ток, А; третье — номинальное индуктивное сопротивление, Ом.

В помещении, отведенном для реактора, не должно быть предметов из магнитного материала, не допускаются металлические замкнутые контуры, охватывающие магнитное поле реактора (например, металлоконструкции).

Бетонный реактор выполнен в виде концентрически расположенных витков из специального круглого многожильного провода, залитого в радиально расположенные бетонные колонны. Расстояния между осями витков составляют по горизонтали 35—45 мм, по

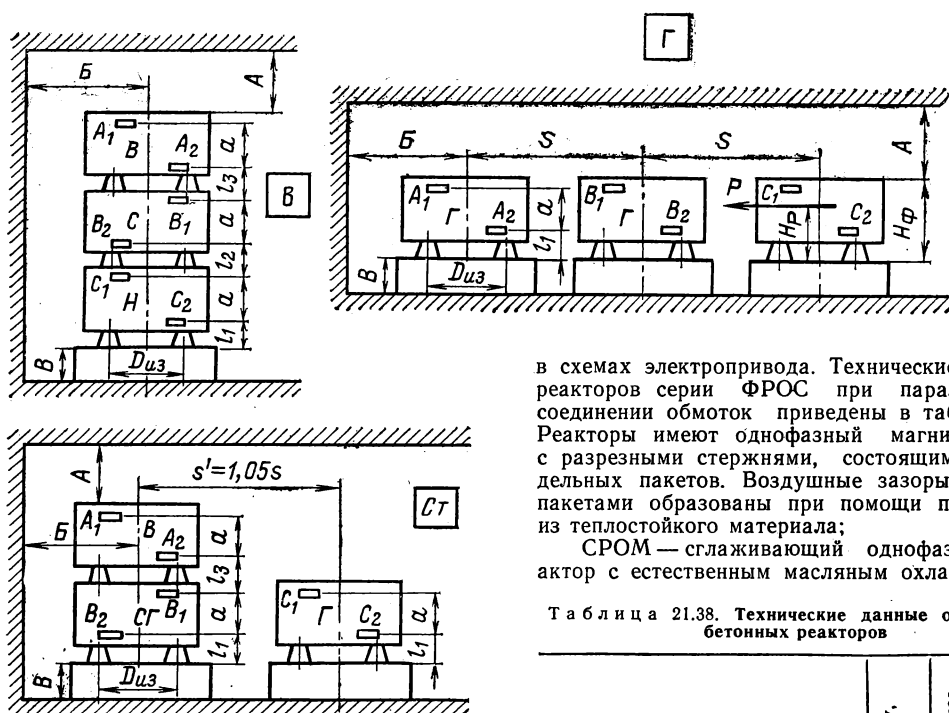


Рис. 21.36. Способы установки реакторов

вертикали — 45 мм. Обмотки реактора на большие токи выполняются из нескольких параллельных проводов с транспозицией, обеспечивающей равномерное распределение токов по параллельным ветвям. Все металлические детали реактора выполняются из немагнитных материалов. В настоящее время в основном выпускаются сдвоенные реакторы.

Для компенсации реактивной мощности, генерируемой линиями электропередачи с номинальным напряжением до 1150 кВ, применяются шунтирующие реакторы. В маркировке типа: Р — реактор, О — однофазный, Т — трехфазный, М — масляный, ДЦ — охлаждение масляное с дутьем и принудительной циркуляцией масла, первое число — номинальная мощность, кВ·А; второе число — класс напряжения, кВ. Технические данные шунтирующих реакторов приведены в табл. 21.40.

Реакторы серии РОМ состоят из плоско-шихтованных ям и двух стержней радиальной шихтовки с насаженными на них обмотками. Магнитопровод с обмотками помещен в бак с трансформаторным маслом. Реакторы серии РОДЦ представляют собой обмотку без ферромагнитного сердечника, окруженную радиально и симметрично магнитным экраном и помещенную в бак с трансформаторным маслом.

Для сглаживания пульсаций выпрямленного тока применяются реакторы серий ФРОС, СРОМ:

ФРОС — фильтровый (сглаживающий) реактор, однофазный, сухой, с естественным воздушным охлаждением, предназначен для сглаживания пульсации выпрямленного тока

в схемах электропривода. Технические данные реакторов серии ФРОС при параллельном соединении обмоток приведены в табл. 21.41. Реакторы имеют однофазный магнитопровод с разрезными стержнями, состоящими из отдельных пакетов. Воздушные зазоры между пакетами образованы при помощи прокладок из теплостойкого материала;

СРОМ — сглаживающий однофазный реактор с естественным масляным охлаждением,

Таблица 21.38. Технические данные одинарных бетонных реакторов

Тип	Потери на фазу, кВт	Электродинамическая стойкость, кА	Масса фазы, т
Для внутренней установки			
РБ, РБУ, РБГ 10-400-0,35	1,6	25	0,88
РБ, РБУ, РБГ 10-400-0,45	1,9	25	0,88
РБ, РБУ, РБГ 10-630-0,25	2,5	40	0,93
РБ, РБУ 10-630-0,40	3,2	32	1,16
РБГ 10-630-0,40	3,2	33	1,02
РБ, РБУ, РБГ 10-630-0,56	4,0	24	1,13
РБ, РБУ, РБГ 10-1000-0,14	3,5	63	1,12
РБ, РБУ 10-1000-0,22	4,4	49	1,34
РБГ 10-100-0,22	4,4	55	1,19
РБ, РБУ, РБГ 10-1000-0,28	5,2	45	1,49
РТ, РБУ, РБГ 10-1000-0,35	5,9	37	1,86
РБ, РБУ, РБГ 10-1000-0,45	6,6	29	1,56
РБ, РБУ, РБГ 10-1000-0,56	7,8	24	1,67
РБ, РБУ 10-1600-0,14	6,1	66	1,77
РБГ 10-1600-0,14	6,1	79	1,61
РБ, РБУ 10-1600-0,20	7,5	52	2,04
РБГ 10-1600-0,29	7,5	60	1,83
РБ, РБУ, РБГ 10-1600-0,25	8,3	49	2,23
РБ, РБУ, РБГ 10-1600-0,35	11,0	37	2,53
РБД, РБДУ 10-1600-0,14	11,0	66	2,38
РБГ 10-2500-0,14	11,0	79	2,07
РБД, РБДУ 10-2500-0,20	14,0	52	2,46
РБГ 10-2500-0,20	14,0	60	2,18
РБДГ 10-2500-0,25	16,1	49	2,74
РБДГ 10-2500-0,35	20,5	37	3,04
РБДГ 10-4000-0,105	18,5	97	2,16
РБДГ 10-4000-0,18	27,7	65	2,89
Для наружной установки			
РБНГ 10-1000-0,45	7,2	29	1,88
РБНГ 10-1000-0,56	8,2	24	1,94
РБНГ 10-1600-0,25	9,8	49	1,88
РБНГ 10-1600-0,35	12,8	37	2,11
РБНГ 10-2500-0,14	13,5	79	2,12
РБНГ 10-2500-0,20	16,8	60	2,33
РБНГ 10-2500-0,25	19,7	49	2,80
РБНГ 10-2500-0,35	23,9	37	3,26

Т а б л и ц а 21.39. Технические данные сдвоенных бетонных реакторов

Тип	Индуктивное сопротивление ветви при встречном токе, Ом	Коэффициент связи	Потери на фазу, кВт	Электродинамическая стойкость, кА	Электродинамическая стойкость при встречных токах, кА	Масса фазы, т
Для внутренней установки						
РБС, РБСУ, РБСГ 10-2×630-0,25	0,135	0,46	4,8	40	14,5	1,44
РБС, РБСУ 10-2×630-0,40	0,200	0,50	6,3	32	12,5	1,68
РБСГ 10-2×630-0,40	0,200	0,50	6,3	33	12,5	1,68
РБС, РБСУ, РБСГ 10-2×630-0,56	0,263	0,53	7,8	24	11,0	1,91
РБС, РБСУ, РБСГ 10-2×1000-0,14	0,071	0,49	6,4	63	21,0	1,90
РБС, РБСУ 10-2×1000-0,22	0,103	0,53	8,4	49	18,5	2,02
РБСГ 10-2×1000-0,22	0,103	0,53	8,4	55	18,5	1,94
РБС, РБСУ, РБСГ 10-2×1000-0,28	0,132	0,53	10,0	45	16,0	2,38
РБСД, РБСДУ 10-2×1000-0,35	0,159	0,55	11,5	37	15,0	2,44
РБСГ 10-2×1000-0,35	0,159	0,55	11,5	37	15,0	2,28
РБСД, РБСДУ 10-2×1000-0,45	0,230	0,49	13,1	29	13,5	2,40
РБСГ 10-2×1000-0,45	0,230	0,49	13,1	23	13,5	2,40
РБСД, РБСДУ 10-2×1000-0,56	0,280	0,50	15,7	24	13,0	2,82
РБСГ 10-2×1000-0,56	0,280	0,50	15,7	24	13,0	2,82
РБС, РБСУ 10-2×1600-0,14	0,062	0,56	11,5	66	26,0	2,96
РБСД, РБСДУ 10-2×1600-0,20	0,098	0,51	14,3	52	22,0	3,12
РБСГ 10-2×1600-0,14	0,062	0,56	11,5	79	26,0	2,68
РБСГ 10-2×1600-0,20	0,098	0,51	14,3	60	22,0	3,12
РБСД, РБСДУ 10-2×1600-0,25	0,119	0,52	16,7	49	20,0	3,47
РБСДГ 10-2×1600-0,25	0,119	0,52	16,7	49	20,0	3,30
РБСДГ 10-2×1600-0,35	0,197	0,46	22,0	37	18,5	3,85
РБСДГ 10-2×2500-0,14	0,067	0,52	22,5	79	29,5	3,50
РБСДГ 10-2×2500-0,20	0,109	0,46	32,1	60	26,0	3,89
Для наружной установки						
РБСНГ 10-2×1000-0,45	0,251	0,44	15,4	29	16,0	3,09
РБСНГ 10-2×1000-0,56	0,330	0,41	17,5	24	15,0	3,27
РБСНГ 10-2×1600-0,25	0,123	0,51	22,1	49	22,0	3,18
РБСНГ 10-2×2500-0,14	0,056	0,60	29,3	79	34,0	3,75

Т а б л и ц а 21.40. Технические данные шунтирующих реакторов компенсации

Тип реактора	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность, кВ·А	Потери, кВт	Масса, кг
РОМ-1200/10	$6,6/\sqrt{3}$	1100	20	38 000
РТД-20000/35	38,5	22 000	120	31 500
РОД-30000/35	$38,5/\sqrt{3}$	30 000	180	35 100
РОД-33333/110	$121/\sqrt{3}$	33 333	180	39 100
РОДЦ-60000/500	$525/\sqrt{3}$	60 000	205	66 600
РОДЦ-110 000/750	$787/\sqrt{3}$	110 000	305	95 000

предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в схемах управляемых выпрямителей. Технические данные реакторов серии СРОМ приведены в табл. 21.42.

Реактор состоит из обмотки и стержневого магнитопровода, в котором имеются горизонтальные пазы, заполненные изоляционным материалом. Обмотка с магнитопроводом помещена в бак с трансформаторным маслом.

В цепях заряда емкости применяются реакторы серий ЕРОС и ЕРОМ. Технические

данные реакторов этих серий приведены в табл. 21.43 и 21.44. Реакторы состоят из обмотки и стержневого магнитопровода, в котором имеются горизонтальные зазоры из изоляционного материала. У реактора серии ЕРОМ обмотка с магнитопроводом помещены в бак с трансформаторным маслом. В обозначении реактора первое число — типовая мощность, кВ·А; второе — класс напряжения.

Для ограничения токов в схемах тиристорных преобразователей для электроприводов применяются реакторы серии РТСТ (реактор трехфазный, сухой, токоограничивающий). В обозначении реактора первое число — номинальный фазный ток, А; второе число — номинальная индуктивность фазы, мГн. Технические данные реакторов серии РТСТ приведены в табл. 21.45. Реакторы имеют климатическое исполнение и предназначены для категории размещения УЗ. Реакторы выдерживают ток трехфазного короткого замыкания в течение 0,5 с при приложении номинального напряжения сети, указанного в таблице.

Конструктивно реакторы выполнены без сердечника, отдельные фазы обмоток расположены по вершинам равностороннего треугольника, что обеспечивает равенство взаимных индуктивностей всех трех фаз. Основные конструктивные металлические детали выполнены из немагнитной стали. Обмотки реактора РТСТ спиральные, однозаходные, без опорного внутреннего цилиндра. Каждая обмотка отдельно сжимается двумя стеклотекстолитовыми дисками с помощью одной центральной шпильки. Для фиксирования определенных

Таблица 21.41. Технические данные реакторов серии ФРОС

Тип реактора	Номинальный выпрямленный ток, А	Индуктивность, мГн	Значение тока, до которого сохраняется индуктивность, А	Потери в меди при номинальном выпрямленном токе, Вт	Масса, кг
ФРОС-800	1600	0,5	3200	1500	1675
ФРОСЗ*-800	2500	0,2	5000	1550	1675
ФРОС-1250	2500	0,32	5000	2500	1990
ФРОСЗ-1250	4000	0,12	8000	2550	1990
ФРОС-2000	4000	0,2	8000	3300	3050
ФРОСЗ-2000	6300	0,08	12 600	3500	3050
ФРОС-3200;	6300	0,125	12 600	4800	—
ФРОСЗ-3200					
ФРОС-4000;	8000	0,1	16 000	5000	—
ФРОСЗ-4000					
ФРОС-5000;	10 000	0,08	20 000	6000	—
ФРОСЗ-5000					

* ФРОСЗ — реакторы защищенного исполнения (в кожухе).

Таблица 21.42. Технические данные сглаживающих реакторов серии СРОМ

Тип реактора	Индуктивность, Гн	Постоянный ток, А	Масса, кг
СРОМ-500/10	0,25	75	1300
СРОМ-1000/10	0,05	250	3500
СРОМ-1500/10	0,2	150	3500
СРОМ-5500/20	0,11	360	10 850

Таблица 21.43. Технические данные зарядных реакторов серии ЕРОС

Тип реактора	Номинальная индуктивность, Гн	Номинальный постоянный ток, А	Потери в реакторе при 115 °С, Вт	Масса, кг
ЕРОС-1000/0,5	3	31,6	1300	1350
ЕРОС-400/10	7,5	11	1000	—
ЕРОС-4000/10	12	9,03	1500	1400

Таблица 21.44. Технические данные зарядных реакторов серии ЕРОМ

Тип реактора	Номинальный пульсирующий ток (действующий), А	Максимальное значение пульсирующего тока, А	Частота пульсирующего тока, Гц	Длительность импульса тока за период, мс	Номинальная индуктивность, Гн	Полная масса, кг
ЕРОМ-350/6	105	240	50	7,7	0,036	1300
ЕРОМ-300/10	35	50	100	10	0,6	1900
ЕРОМ-400/10	9,7	13,6	15	67	14	1900
ЕРОМ-1000/10	35	50	25	40	2,4	2800
ЕРОМ-1200/10	1060	2600	100	3,3	0,0014; 0,00035	3750
ЕРОМ-5000/10	4000	6250	0,125	6000	0,00735	29 600

Таблица 21.45. Технические данные реакторов серии РТСТ

Тип реактора	Номинальное напряжение, В	Номинальный фазный ток, А	Номинальная индуктивность фазы, мГн	Активное сопротивление обмоток, мОм	Масса, кг	Цена, руб.
РТСТ-20,5-1,08	220	20,5	1,08	150	10	—
РТСТ-20,5-1,53	310	20,5	1,53	192	12	—
РТСТ-20,5-2,02	410	20,5	2,02	233	14	—
РТСТ-41-0,54	220	41	0,54	54	15	—
РТСТ-41-0,76	310	41	0,76	70,8	19	—
РТСТ-41-1,01	410	41	1,01	88,5	23	—
РТСТ-82-0,27	220	82	0,27	19,4	25	—
РТСТ-82-0,38	410	82	0,38	25,2	32	—
РТСТ-82-0,505	410	82	0,505	31,7	40	—
РТСТ-165-0,135	220	165	0,135	10,7	44	—
РТСТ-165-0,19	310	165	0,19	13,9	52	—
РТСТ-165-0,25	410	165	0,25	17,1	62	—
РТСТ-265-0,08	220	265	0,084	5,2	55	405
РТСТ-265-0,118	310	265	0,118	6,7	68	—
РТСТ-265-0,156	410	265	0,156	8,35	80	—
РТСТ-410-0,54	220	410	0,054	2,65	76	—
РТСТ-410-0,076	310	410	0,076	3,34	89	—
РТСТ-410-0,101	410	410	0,101	4,05	103	—
РТСТ-660-0,034	220	660	0,034	1,12	104	585
РТСТ-660-0,048	310	660	0,048	1,5	130	680
РТСТ-660-0,064	410	680	0,064	1,8	145	—
РТСТ-820-0,027	220	820	0,027	0,815	130	680
РТСТ-820-0,038	310	820	0,038	0,992	151	745
РТСТ-820-0,0505	410	820	0,0505	1,23	176	—

Таблица 21.46. Ваземляющие дугогасящие реакторы (ГОСТ 19470-74)

Тип	S, кВ·А	U, кВ		Пределы регулирования, А	Габариты, мм		Масса полная, кг
		сети	реактора		Высота	В плане	
Со ступенчатым регулированием							
РЗДСОМ-115/6	115	6	3,81	12,5—25	—	—	—
РЗДСОМ-230/6	230	6	3,81	25—50	2000	1200×1400	1200
РЗДСОМ-460/6	460	6	3,81	50—100	2600	1400×1700	2000
РЗДСОМ-920/6	920	16	3,81	100—200	2700	1500×1800	2500
РЗДСОМ-190/10	190	10	6,35	12,5—25	—	—	—
РЗДСОМ-380/10	380	10	6,35	25—50	2600	1400×1700	2000
РЗДСОМ-760/10	760	10	6,35	50—100	2700	1500×1800	2500
РЗДСОМ-1520/10	1520	10	6,35	100—200	3100	1600×2200	4000
РЗДСОМ-115/15; 75	115	15	9,09	5—10	2000	1200×1400	1100
РЗДСОМ-155/20	155	20	12,07	6,25—12,5	2600	1400×1700	2000
РЗДСОМ-310/35	310	35	22,2	6,25—12,5	2600	1400×1700	2000
РЗДСОМ-620/35	620	35	22,2	12,5—25	2700	1500×1800	2500
РЗДСОМ-1240/35	1240	35	22,2	25—50	3100	1600×2200	4000
С плавным регулированием							
РЗДПОМ-120/6	120	6	3,81	5,2—26,2	2200	1500×1700	2200
РЗДПОМ-300/6	300	6	3,81	13,1—65,5	2600	1700×1900	3200
РЗДПОМ-190/10	190	10	6,35	5,0—25	2200	1500×1700	2800
РЗДПОМ-480/10	480	10	6,35	12,6—63	2600	1900×2300	4500
РЗДПОМ-480/20	480	20	12,7	6,3—31,4	—	—	—
РЗДПОМ-700/35	700	35	22,2	5,7—28,4	—	—	—
РЗДПОМ-800/35	800	35	22,2	7,2—36	—	—	—

расстояний между обмотками отдельных фаз и образования законченной трехфазной конструкции реакторов применены две трехлучевые крестовины. В нижней крестовине имеются отверстия для крепления реакторов на месте установки.

Для компенсации емкостных токов замыкания на землю применяются заземляющие реакторы серий РЗДСОМ (реактор заземляющий, дугогасящий со ступенчатым регулированием, однофазный, масляный) и РЗДПОМ (реактор заземляющий, дугогасящий с плавным регулированием, однофазный, масляный). Параметры этих реакторов приведены в табл. 21.46. Ступенчатое регулирование осуществляется вручную на отключенном от сети реакторе, число ответвлений 5. Плавное регулирование осуществляется путем изменения воздушного зазора в магнитопроводе с помощью электропривода без отключения реактора от сети и при отсутствии замыкания на землю.

Список литературы

- 21.1. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977. 431 с.
- 21.2. Таев И. С. Электрические аппараты управления. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
- 21.3. Бондаренко Е. М., Дорофеев Б. Г., Стукалкин А. Н. Электрические сопротивления. М.: Энергия, 1967. 120 с.
- 21.4. ГОСТ 4870-78. Резисторы металлические и блоки резисторов. Общие технические условия.
- 21.5. ГОСТ 4871-77. Реостаты пусковые и пускорегулирующие для электродвигателей постоянного тока. Общие технические условия.
- 21.6. ГОСТ 4888-77. Реостаты возбуждения. Общие технические условия.
- 21.7. Ренне В. Т. Электрические конденсаторы. Л.: Энергия, 1969. 592 с.
- 21.8. Силловые электрические конденсаторы/Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров, Г. Т. Назарова, И. Ф. Переселенцев. — М.: Энергия, 1975. 245 с.
- 21.9. Гулевич А. И., Киреев А. П. Производство силовых конденсаторов. М.: Высшая школа, 1975. 439 с.
- 21.10. Кучинский Г. С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. Л.: Энергия, 1973. 175 с.
- 21.11. ГОСТ 1282-79Е. Конденсаторы для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока частоты 50 и 60 Гц.
- 21.12. ГОСТ 18689-81Е. Конденсаторы для электротермических установок на частоту от 0,5 до 10,0 кГц.
- 21.13. ГОСТ 15581-80Е. Конденсаторы связи и отбора мощности для линий электропередачи.
- 21.14. Ануфриев Ю. А., Гусев В. Н., Смирнов В. Ф. Эксплуатационные характеристики и надежность электрических конденсаторов. М.: Энергия, 1976. 225 с.
- 21.15. Прейскурант № 15-04. Оптовые цены на аппаратуру электрическую низковольтную. Ч. 1. М.: Прейскурантиздат, 1980. 590 с. (с дополнениями № 1—38).
- 21.16. Прейскурант № 15-08. Оптовые цены на конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. М.: Энергия, 1979. 224 с.
- 21.17. Ермуратский В. В., Ермуратский П. В. Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. М.: Энергия, 1979. 224 с.
- 21.18. Методы расчета электростатических полей/Н. Н. Миролюбов, М. В. Костенко, М. Л. Левинштейн, Н. Н. Тиходеев. — М.: Высшая школа, 1963. — 414 с.
- 21.19. Справочник по электрическим конденсаторам/Под ред. В. В. Ермуратского. Кишинев.: Штица, 1982. 310 с.
- 21.20. ГОСТ 21414-75. Резисторы. Термины и определения.
- 21.21. ГОСТ 21415-75. Конденсаторы постоянной емкости. Термины и определения.
- 21.22. ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.
- 21.23. ГОСТ 12.2.007.5-75. Система стандартов безопасности труда. Конденсаторы силовые. Установки конденсаторные. Требования безопасности.
- 21.24. Лейтес Л. В. Торсионные реакторы. М.: Информэлектро, 1966. 96 с.
- 21.25. Карасев В. В., Кубарев Л. П., Лейтес Л. В. Обобщенный аналитический метод оптимизации и оценки параметров реакторов. — Электротехника, 1977, № 4, с. 1—8.
- 21.26. Стернин В. Г., Карпенский А. К. Сухие токоограничивающие реакторы. М.: Энергия, 1965. 256 с.

21.27. Чунихин А. А. Электрические аппараты. М.: Энергия, 1975. 648 с.

21.28. Лейтес Л. В. О стандарте на терминологию реакторов.—Электротехника, 1974, № 4, с. 39—42.

21.29. ГОСТ 18624-73. Реакторы электрические. Термины и определения.

21.30. ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.

21.31. ГОСТ 12.2.007.5-75. Система стандартов

безопасности труда. Конденсаторы и установки конденсаторные. Требования безопасности.

21.32. 12.2.007.2-75. Система стандартов безопасности труда. Трансформаторы силовые и реакторы электрические. Требования безопасности.

21.33. Меерович В. М., Соколовский В. Л. Расчет стержневых реакторов без ярм.—Электротехника, 1983, № 10, с. 31—33.

21.34. Чунихин А. А., Жаворонков М. А. Аппараты высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985. 400 с.

Раздел 22

ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

СОДЕРЖАНИЕ

22.1. Основные определения и обозначения	181	22.16. Определение основных электрических параметров трансформатора	194
22.2. Основные части трансформатора	182	22.17. Определение основных размеров трансформатора	195
22.3. Классификация трансформаторов	183	22.18. Изоляция в трансформаторах	198
22.4. Работа трансформатора под нагрузкой	184	22.19. Главная изоляция обмоток. Минимально допустимые изоляционные расстояния	200
22.5. Холостой ход трансформатора. Опыт холостого хода	185	22.20. Продольная изоляция обмоток	201
22.6. Короткое замыкание трансформатора. Опыт короткого замыкания	186	22.21. Выбор конструкции и расчет обмоток	203
22.7. Приближенный расчет параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора	187	22.22. Расчет обмоток НН	204
22.8. Изменение вторичного напряжения трансформатора. Потери и коэффициент полезного действия	187	22.23. Расчет обмоток ВН	205
22.9. Параллельная работа трансформаторов и группы соединения обмоток	189	22.24. Определение параметров короткого замыкания	206
22.10. Несимметричная нагрузка трехфазных двухобмоточных трансформаторов	189	22.25. Токи короткого замыкания и механические силы в обмотках	208
22.11. Основные уравнения и схема замещения трехобмоточного трансформатора	189	22.26. Расчет магнитной системы	209
22.12. Трансформаторы с расщепленными обмотками	191	22.27. Приближенное определение масс активных материалов трансформатора	212
22.13. Автотрансформаторы	192	22.28. Нагрузочная способность трансформатора	212
22.14. Регулирование и стабилизация напряжения трансформатора	193	22.29. Трансформаторы и автотрансформаторы для сетей 10, 35, 110, 220, 330 и 500 кВ	213
22.15. Схема расчета трансформатора	194	22.30. Трансформаторы малой мощности	220
		22.31. Стандартизация в трансформаторостроении	222
		Список литературы	222

22.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока. Различают двухобмоточные трансформаторы, имеющие две гальванически не связанные обмотки, и трех- и многообмоточные трансформаторы, имеющие три и более гальванически не связанных обмоток. Передача энергии из первичной цепи трансформатора во вторичную происходит посредством магнитного поля.

Автотрансформатором называется трансформатор, две или более обмоток которого гальванически связаны так, что они имеют общую часть. Обмотки автотрансформатора связаны электрически и магнитно, и передача энергии из первичной цепи во вторичную происходит как посредством магнитного поля, так и электрическим путем. Помимо гальванически связанных обмоток автотрансформатор может иметь и другие обмотки, не имеющие гальванической связи.

Магнитное поле, созданное в трансформаторе совокупностью магнитодвижущих сил всех его обмоток и других частей, в которых протекает электрический ток, можно для расчетов, определения параметров и проведения исследований условно разделить на взаимосвязанные части: основное поле, поле рассеяния обмоток, поле токов нулевой последовательности и т. д. Часть магнитного поля трансформатора, созданная той частью магнитодвижущих сил всех его основных обмоток, геометрическая сумма векторов которых в каждой фазе обмоток равна нулю, называется магнитным полем рассеяния обмоток. Магнитным полем токов нулевой последовательности называется часть магнитного поля, созданная геометрической суммой МДС токов нулевой последовательности всех его основных обмоток. Основным магнитным полем трансформатора называется часть магнитного поля, созданная разностью суммы магнитодвижущих сил всех его обмоток и суммы магнитодвижущих сил обмоток, создающих поле рассеяния обмоток и поле токов нулевой последовательности обмоток.

Трансформатор называется силовым, если он применяется для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в уста-

новках, предназначенных для приема и использования электрической энергии. К силовым относятся трансформаторы трехфазные и многофазные мощностью 6,3 кВ·А и более, однофазные мощностью 5 кВ·А и более. При меньших мощностях трансформаторы называются трансформаторами малой мощности. Различают силовые трансформаторы общего назначения, предназначенные для включения в сети, не отличающиеся особыми условиями работы, или для непосредственного питания приемников электрической энергии, не отличающихся особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы. Силовые трансформаторы специального назначения предназначаются для непосредственного питания сетей или приемников электрической энергии, если эти сети или приемники отличаются особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы. К числу таких сетей и приемников электрической энергии относятся, например, подземные рудничные и шахтные сети и установки, выпрямительные установки, электрические печи и т. п.

Номинальными данными называются указанные изготовителем параметры трансформатора (например, частота, мощность, напряжение, ток), обеспечивающие его работу в условиях, установленных нормативным документом, и являющиеся основой для определения условий изготовления, испытаний, эксплуатации. Номинальной частотой называется частота, на которую рассчитан трансформатор, она указана на его паспортной табличке. Номинальным напряжением обмотки трансформатора называется указанное на паспортной табличке напряжение между зажимами, связанными с данной обмоткой, при холостом ходе трансформатора.

Номинальной мощностью обмотки трансформатора называется указанное на паспортной табличке значение полной мощности на основном ответвлении обмотки, гарантированное изготовителем в номинальных условиях места установки и охлаждающей среды при номинальной частоте и номинальном напряжении обмотки. Номинальной мощностью двухобмоточного трансформатора является номинальная мощность каждой из его обмоток, в трехобмоточном трансформаторе — наибольшая из номинальных мощностей трех его обмоток. Номинальный ток обмотки трансформатора определяется по ее номинальным мощности и напряжению. При наличии в обмотке регулировочных ответвлений для каждого ответвления устанавливаются свои номинальные мощность, напряжение и ток. Номинальной мощностью автотрансформатора является номинальная мощность обмоток, имеющих общую часть, т. е. проходная мощность.

Для масляных силовых трансформаторов общего назначения номинальными условиями места установки и охлаждающей среды согласно ГОСТ 11677-85 являются: высота над уровнем моря не более 1000 м; температура охлаждающей среды: для воды — не более +25 °С у входа в охладитель, для воздуха — естественно изменяющаяся температура охлаждающего воздуха не более +40 °С при среднесуточной температуре воздуха не более +30 °С и среднегодовой его температуре не более

+20 °С; температура окружающего воздуха не ниже —45 °С.

Основные обозначения:

- S — мощность, В·А, кВ·А;
- S_{Φ} — мощность на одну фазу, В·А, кВ·А;
- $S_{ст}$ — мощность на один стержень, В·А, кВ·А;
- P_K — потери короткого замыкания, Вт;
- P_x — потери холостого хода, Вт;
- $\bar{E}$ — действующее значение ЭДС, В;
- U — действующее значение напряжения, В;
- I — действующее значение тока, А;
- J — плотность тока, А/м²;
- Φ — рабочий магнитный поток, Вб;
- B — магнитная индукция, Тл;
- I_x, I_a, I_p — действующее значение тока холостого хода и его активная и реактивная составляющие, А;
- i_0 — ток холостого хода в процентах к номинальному, %;
- Z_1, Z_2 — полные сопротивления обмоток фазы, Ом;
- r_1, r_2 — активные сопротивления обмоток фазы, Ом;
- x_1, x_2 — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток фазы, Ом;
- $\underline{Z}_{12} = r_{12} + jx_{12}$ — сопротивление фазы ветви тока холостого хода в схеме замещения, Ом;
- $\underline{Z} = r + jx$ — сопротивление фазы нагрузки, Ом;
- u_K, u_a, u_p — напряжение короткого замыкания и его активная и реактивная составляющие, % $U_{ном}$;
- w — число витков в обмотке;
- d — диаметр стержня, м;
- C — расстояние между осями стержней, м;
- l_c — высота стержня, м;
- h_d — высота яра, м;
- P — площадь поперечного сечения (стержня, яра, витка и т. д.), м²;
- m — число фаз.

Индексы величин:

- n — номинальных;
- Φ — фазных;
- p — относящихся к рассеянию;
- x — относящихся к холостому ходу;
- k — относящихся к короткому замыканию;
- v — относящихся к витку.

22.2. ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

Основными частями трансформатора являются магнитная система (магнитопровод), обмотки и система охлаждения.

Магнитная система (магнитопровод) трансформатора представляет собой комплект пластин или других элементов электротехнической стали или иного ферромагнитного материала, собранных в определенной геометрической форме, предназначенный для локализации в нем основного магнитного поля трансформатора. Магнитная система в полностью собранном

виде совместно со всеми узлами и деталями, служащими для скрепления ее отдельных частей в единую конструкцию, называется остовом трансформатора.

Основным элементом обмотки является виток, т. е. деталь из электрического проводника, или ряд параллельно соединенных таких деталей, однократно охватывающий часть магнитной системы трансформатора, электрический ток которой совместно с токами других таких деталей и других частей трансформатора создает магнитное поле трансформатора и в которой под действием этого магнитного поля наводится электродвижущая сила.

Обмоткой называется совокупность витков, образующих электрическую цепь, в которой суммируются ЭДС, наведенные в витках с целью получения высшего, среднего или низшего напряжения трансформатора или с другой целью. В трехфазном трансформаторе под обмоткой обычно подразумевают совокупность соединяемых между собой обмоток одного напряжения трех фаз.

Основными называются обмотки трансформатора, к которым подводится энергия преобразуемого или от которых отводится энергия преобразованного переменного тока. Кроме основных трансформатор может иметь вспомогательные обмотки, предназначенные, например, для компенсации третьей гармонической магнитного поля, подмагничивания магнитной системы постоянным током, питания сети собственных нужд с мощностью существенно меньшей, чем номинальная мощность трансформатора, и т. п.

Обмотки, как правило, выполняются из медного или алюминиевого изолированного провода в виде круговых цилиндров. В двухобмоточном трансформаторе различают обмотку высшего напряжения (ВН), присоединяемую к сети более высокого напряжения, и обмотку низшего напряжения (НН), присоединяемую к сети более низкого напряжения. В трехобмоточном трансформаторе различают обмотки высшего (ВН), среднего (СН) и низшего (НН) напряжений.

Единая конструкция, включающая в собранном виде остов трансформатора, обмотки с их изоляцией, отводы, т. е. проводники, соединяющие обмотки между собой и с другими частями трансформатора, части устройства регулирования напряжения, а также все детали, служащие для их механического соединения, называется активной частью трансформатора.

Трансформаторы с естественным воздушным охлаждением (сухие трансформаторы) обычно не имеют специальной системы охлаждения. В масляных трансформаторах в систему охлаждения входят бак трансформатора, заливаемый маслом, а для мощных трансформаторов — также и охладители, вентиляторы, масляные насосы, теплообменники и т. д.

22.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

По системам охлаждения

а) Естественное воздушное охлаждение — обмотки, магнитная система и другие части трансформатора имеют непосредственное со-

прикосновение с окружающим воздухом; охлаждение происходит путем излучения и естественной конвекции воздуха; применяется для мощностей до 1600—2500 кВ·А и напряжений до 10—20 кВ; трансформатор может снабжаться защитным кожухом.

Сравнительно редко применяются сухие герметичные трансформаторы, заполненные воздухом или другим газом, играющим роль изолирующей среды и теплоносителя, и трансформаторы с литой изоляцией или кварценополненные, в которых изолирующей средой и теплоносителем служит литой электроизоляционный компаунд или кварцевый песок.

б) Естественное масляное охлаждение — активная часть трансформатора помещается в бак, заливаемый трансформаторным маслом, служащим изолирующей средой и теплоносителем; охлаждение обмоток и магнитной системы происходит путем естественной конвекции масла, поверхности бака — путем излучения и естественной конвекции воздуха; применяется для мощностей 10—10 000 кВ·А.

В некоторых случаях бак заливается другим жидким диэлектриком, например совтолом, играющим в охлаждении трансформатора ту же роль, что и масло.

в) Масляное охлаждение с дутьем — теплоотдача с поверхности бака и его частей форсируется путем обдувания поверхности вентиляторами при естественной конвекции масла внутри бака; позволяет увеличить теплоотдачу примерно в 1,5—1,6 раза по сравнению с естественным; применяется для мощностей 10 000—63 000 кВ·А.

г) Масляное охлаждение с принудительной циркуляцией масла — масло из бака откачивается насосом, прогоняется через водяной или воздушный теплообменник и, охлажденное, возвращается в бак; применяется при мощностях 16 000—25 000 кВ·А и более, а для специальных трансформаторов, служащих для питания электротеплиц, — при мощностях 2800—5 000 кВ·А и более.

По форме магнитной системы

Различают магнитные системы плоские, т. е. такие, в которых продольные оси всех стержней и ярм расположены в одной плоскости, и пространственные, в которых эти оси расположены в разных плоскостях (рис. 22.1).

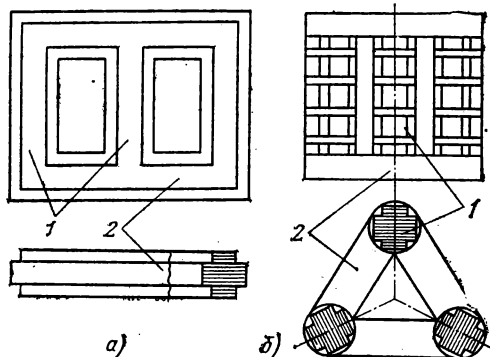


Рис. 22.1. Плоская (а) и пространственная (б) магнитные системы:
1 — стержень; 2 — ярмо

По схеме магнитной системы

а) Стержневые трансформаторы — ярма, замыкающие магнитную цепь (рис. 22.2, а), прилегают к торцевым поверхностям обмоток, не охватывая их боковых поверхностей; стержни, несущие обмотки, располагаются вертикально.

б) Броневые трансформаторы — ярма охватывают не только торцевые, но и боковые поверхности обмоток (рис. 22.2, б); стержни могут располагаться горизонтально или вертикально; каждый стержень имеет не менее двух боковых ярем.

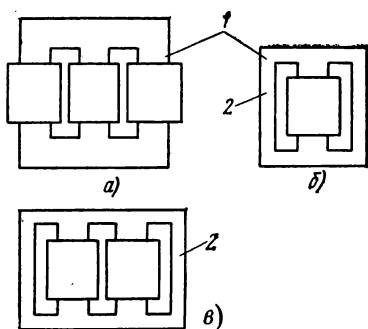


Рис. 22.2. Магнитные системы:

а — трехфазная стержневая; б — однофазная броневая; в — бронестержневая однофазная; 1 — стержни; 2 — ярма

в) Бронестержневые трансформаторы — только часть стержней имеют боковые ярма или каждый стержень имеет не более одного бокового ярма (рис. 22.2, в).

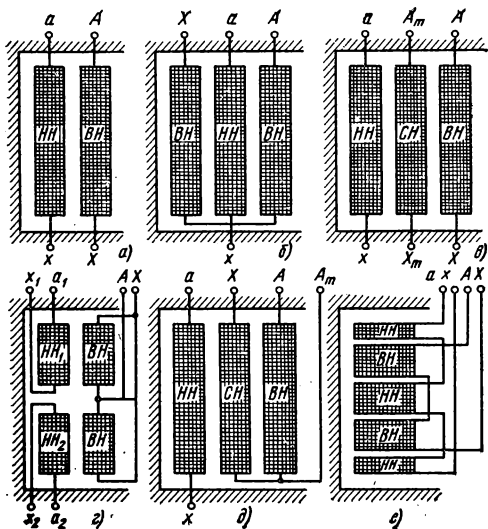


Рис. 22.3. Расположение обмоток силовых трансформаторов. Концентрические обмотки (а—д):

а — двухобмоточный трансформатор; б — двойная concentрическая обмотка ВН; в — трехобмоточный трансформатор; г — расщепленная обмотка НН; д — трехобмоточный автотрансформатор; е — чередующиеся обмотки

По расположению обмоток

а) Трансформаторы с concentрическими обмотками — обмотки ВН и НН (также СН) выполняются в виде цилиндров и располагаются на стержне concentрически (рис. 22.3, а—д).

Conцентрические обмотки могут располагаться на стержнях силовых трансформаторов и автотрансформаторов в различном порядке (рис. 22.3, а, б, в, г, д).

б) Трансформаторы с чередующимися обмотками — обмотки ВН и НН выполняются в виде невысоких цилиндров и располагаются, чередуясь в осевом направлении (рис. 22.3, е).

22.4. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

Основные уравнения для двухобмоточного однофазного или для одной фазы трехфазного трансформатора:

уравнения напряжений для каждой обмотки

$$\underline{U}_1 = I_1 \underline{Z}_1 + I_0 \underline{Z}_0 = I_1 \underline{Z}_1 - E_1;$$

$$\underline{U}_2 = -I_2 \underline{Z}_2 - n_{21} I_0 \underline{Z}_0 = -I_2 \underline{Z}_2 + E_2;$$

$$\text{уравнение токов } I_0 = I_1 + n_{21} I_2;$$

$$\text{коэффициенты трансформации } n_{12} = U_1/U_2; n_{21} = U_2/U_1; n_{12} = 1/n_{21};$$

$$\text{уравнение МДС}$$

$$\omega_1 I_1 + \omega_2 I_2 = I_0 \omega_1,$$

$$I_0 = f(\Phi) \Phi_m^* = \frac{E_1}{4,44 f \omega_1} \approx \frac{U_1}{4,44 f \omega_1}.$$

Для величин, приведенных к первичной обмотке:

$$\text{уравнения напряжений}$$

$$\underline{U}_1 = I_1 \underline{Z}_1 + I_0 \underline{Z}_0; \quad \underline{U}_2 = -I_2' \underline{Z}_2' - I_0 \underline{Z}_0;$$

$$\text{уравнение токов}$$

$$I_0 = I_1 + I_2'.$$

Вторичные величины приводятся к числу витков первичной обмотки:

$$U_2' = U_2 n_{12}; \quad I_2' = I_2 n_{21}; \quad Z_2' = Z_2 n_{12}^2;$$

$$Z' = Z n_{12}^2; \quad r_2' = r_2 n_{12}^2; \quad x_2' = x_2 n_{12}^2.$$

Векторная диаграмма трансформатора для величин, приведенных к числу витков первичной обмотки, показана на рис. 22.4; схема замещения — на рис. 22.5.

Для схемы замещения по рис. 22.5 (задано U_1)

$$I_2' = \frac{-U_1}{A}; \quad I_1 = \frac{U_1 Z_0 + Z' + Z_2'}{Z_0 A};$$

$$\underline{U}_2 = \frac{U_1 Z'}{A},$$

* Здесь и далее магнитный поток выражен в веберах, магнитная индукция — в теслах.

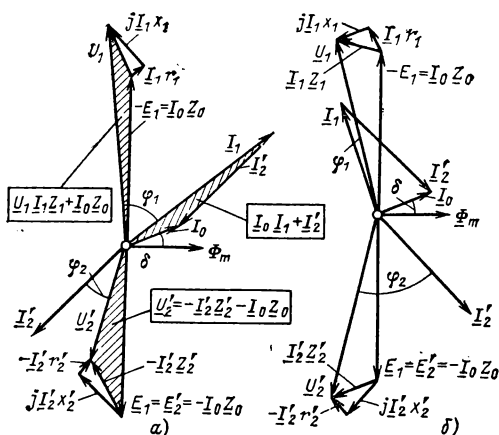


Рис. 22.4. Векторные диаграммы нагруженного трансформатора:

а — смешанная индуктивная нагрузка; б — смешанная емкостная нагрузка

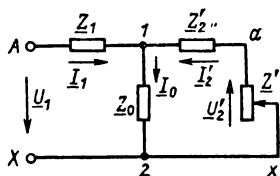


Рис. 22.5. Схема замещения трансформатора

где

$$\underline{A} = \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2 + \underline{Z}' + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}'_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}'}{\underline{Z}_0} \right).$$

22.5. ХОЛОСТОЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА. ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА

Холостым ходом называется режим работы трансформатора, при котором $I_2 = 0$ ($\underline{Z} = \infty$). Основные уравнения принимают вид

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= I_1 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0) = I_1 \underline{Z}_1 - E_1; \\ \underline{U}_2 &= -n_{21} I_0 \underline{Z}_0 = E_2; \quad I_1 = I_0. \end{aligned}$$

Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе дана на рис. 22.6.

Током холостого хода называется ток, который при номинальном напряжении и номинальной частоте устанавливается в одной из обмоток при другой не замкнутой на внешнюю цепь обмотке в двухобмоточном трансформаторе или при всех остальных не замкнутых на внешние цепи обмотках в трехобмоточном трансформаторе. Потери, возникающие при этом в трансформаторе, называются потерями холостого хода (P_x). Ток холостого хода (i_0) обычно выражается в процентах номинального тока соответствующей обмотки.

Опыт холостого хода (рис. 22.7) может производиться со стороны любой из двух (трех) обмоток трансформаторов; он входит в число обязательных приемо-сдаточных испытаний, которым подвергается каждый силовой трансформатор перед выпуском с завода.

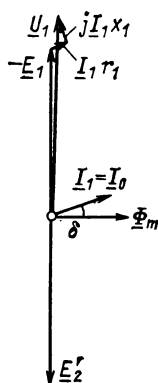


Рис. 22.6

Рис. 22.6. Векторная диаграмма для режима холостого хода

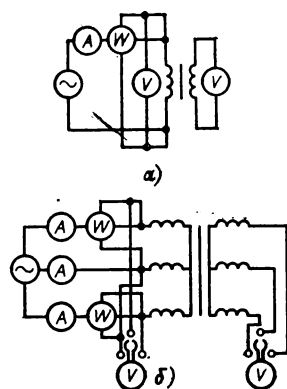


Рис. 22.7

Рис. 22.7. Схемы опыта холостого хода:

а — однофазный трансформатор; б — трехфазный трансформатор

При опыте холостого хода определяют ($I_2 = 0$; $f = f_n$; $U_1 = U_n$): коэффициент трансформации напряжений

$$\frac{U_1}{U_2} = \left| \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0}{n_{21} \underline{Z}_0} \right| \approx \frac{E_1}{E_2} = n_{12} = \frac{w_1}{w_2};$$

потери холостого хода P_x , ток холостого хода

$$i_0 = \frac{I_x}{I_n} 100.$$

Для трехфазного трансформатора

$$I_x = \frac{I_{xA} + I_{xB} + I_{xC}}{3}.$$

Для трансформаторов мощностью от 25 до 63 000 кВ·А i_0 составляет ориентировочно от 3,2 до 0,6 %, мощностью от 80 000 до 1 000 000 кВ·А — от 0,55 до 0,3 %.

Полное сопротивление цепи взаимной индукции для величин, отнесенных к одной фазе,

$$\underline{Z}_0 = \frac{n_{12} U_2}{I_1} \approx \frac{\underline{U}_x}{I_x}; \quad \cos \varphi_x = \frac{P_x}{\underline{U}_x I_x};$$

$$r_0 \approx \underline{Z}_x \cos \varphi_x = \frac{P_x}{I_x^2};$$

$$x_0 = \sqrt{\underline{Z}_0^2 - r_0^2} \approx \underline{Z}_x \sin \varphi_x.$$

Вследствие нелинейной зависимости между напряжением U_x и током при холостом ходе I_x сопротивления $\underline{Z}_0$ и x_0 сильно зависят от насыщения магнитной системы и заметно возрастают с уменьшением напряжения.

Потери холостого хода

$$P_x = U_x I_x \cos \varphi_x;$$

для трехфазного трансформатора

$$P_x = 3 U_x I_x \cos \varphi_x.$$

Вследствие малого изменения магнитного потока трансформатора при переходе от холостого хода при номинальном напряжении к нагрузке номинальным током потери P_x и ток I_x , измеренные при холостом ходе, обычно принимают равными магнитным потерям и намагничивающему току I_0 при нагрузке трансформатора номинальным током при номинальном напряжении.

22.6. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА. ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Коротким замыканием называется режим работы трансформатора, при котором $U_2=0$ ($Z=0$). Основные уравнения приобретают вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= I_1 Z_1 + I_0 Z_0 = I_1 Z_1 - \dot{E}_1; \\ 0 &= -I_2 Z_2 - n_{21} I_0 Z_0 = -I_2 Z_2 + \dot{E}_2; \\ I_0 &= I_1 + n_{21} I_2. \end{aligned}$$

Полное сопротивление цепи трансформатора

$$\frac{U_1}{I_1} = Z_K = Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}.$$

При наличии стальной магнитной системы и малом ее насыщении

$$\frac{Z}{Z_2 + Z_0} \approx 1,$$

т. е. ток I_0 можно считать исчезающе малым по сравнению с I_1 и I_2 и

$$\begin{aligned} Z_K &\approx Z_1 + Z_2' = (r_1 + r_2') + \\ &+ j(x_1 + x_2') = r_K + jx_K. \end{aligned}$$

При опыте короткого замыкания ($Z=0$; $U_2=0$; $f=f_n$; $I_1=I_{1н}$; $I_2=I_{2н}$) определяют для величин, приведенных к одной фазе; сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K}; \quad \cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_K I_K}; \quad r_K = Z_K \cos \varphi_K;$$

$$x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2} = Z_K \sin \varphi_K.$$

Значения r_K , Z_K и $\cos \varphi_K$, измеренные при температуре Θ , должны быть приведены к нормированной расчетной температуре обмотки $+75^\circ\text{C}$ для масляных трансформаторов и сухих с изоляцией классов нагревостойкости A и B; для сухих трансформаторов с изоляцией классов F, H и C расчетная температура $+115^\circ\text{C}$ (x_K практически не зависит от температуры)

$$r_{K75} = r_{K\Theta} \frac{309,5}{234,5 + \Theta}; \quad Z_{K75} = \sqrt{r_{K75}^2 + x_K^2};$$

$$\cos \varphi_{K75} = \frac{r_{K75}}{Z_{K75}};$$

$$r_{K115} = r_{K\Theta} \frac{349,5}{234,5 + \Theta}.$$

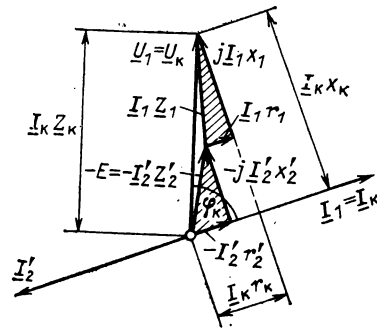


Рис. 22.8. Векторная диаграмма для режима короткого замыкания при токе $I_0=0$

Потери короткого замыкания, найденные при опыте, $P_K = U_K I_K \cos \varphi_K$ (для трехфазного трансформатора $P_K = 3 I_K^2 R_K$) также приводятся к температуре $+75^\circ\text{C}$ (или $+115^\circ\text{C}$), т. е.

$$P_{K75} = I_K^2 r_{K75}.$$

Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании в этом случае — по рис. 22.8.

Режим короткого замыкания, возникающий случайно в процессе эксплуатации при номинальном первичном напряжении, является аварийным процессом, сопровождающимся весьма большими токами в обмотках. Многократное повышение токов по сравнению с номинальными (в 10—20 раз) может привести к повреждению изоляции обмоток вследствие нагрева и к разрушению обмоток механическими силами, возникающими при этом режиме между обмотками (расчет этих сил см. в § 22.25).

Напряжением короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называется напряжение, которое при номинальной частоте следует подвести к зажимам одной из обмоток при замкнутой накоротко другой обмотке, чтобы в них установились номинальные токи. Обычно напряжение короткого замыкания приводится к нормированной расчетной температуре и выражается в процентах номинального напряжения (u_K , %). Потери, возникающие в трансформаторе при этом режиме, называются потерями короткого замыкания P_K .

Опыт короткого замыкания проводится при замкнутой накоротко вторичной обмотке (рис. 22.9) при первичном напряжении $U_{1н}$, пониженном настолько, чтобы токи в обмотках $I_{1н}$, $I_{2н}$ не превысили их номинальные значения. Этот опыт может производиться со стороны любой из двух обмоток трансформатора. Он входит в число обязательных прямо-сда-

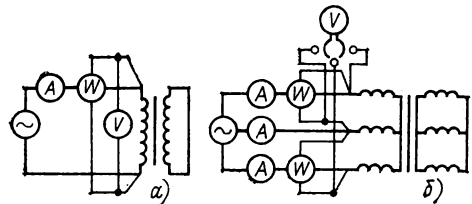


Рис. 22.9. Схемы опыта короткого замыкания: а — однофазный трансформатор; б — трехфазный трансформатор

точных испытаний, которым подвергается каждый силовой трансформатор перед выпуском с завода.

Напряжение короткого замыкания

$$u_{к,н} = \frac{U_{к,н}}{U_{1н}} 100 = \frac{I_{1н} Z_{к75}}{U_{1н}} 100 \%;$$

активная составляющая

$$u_a = \frac{I_{1н} r_{к75}}{U_{1н}} 100 \%;$$

реактивная составляющая

$$u_p = \frac{I_{1н} x_k}{U_{1н}} 100 \%;$$

$$u_k = \sqrt{u_a^2 + u_p^2}; \quad u_a = u_k \cos \varphi_k;$$

$$u_p = u_k \sin \varphi_k.$$

При опыте короткого замыкания по сравнению с холостым ходом многократно уменьшаются E_1 , Φ_m и магнитные потери. Вследствие этого потери, измеренные при опыте короткого замыкания, принимаются практически равными тем основным и добавочным потерям, которые возникают в проводниках обмоток и отводов и в деталях конструкции вблизи них при работе трансформатора при номинальном токе и номинальном напряжении.

22.7. ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДВУХОБОМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Приближенный расчет режимов работы двухобмоточного трансформатора может быть произведен по упрощенной схеме замещения (рис. 22.10):

$$I'_2 \approx \frac{-\underline{U}_1}{Z_1 + Z'_2 + Z'_1} = \frac{-\underline{U}_2}{Z_k + Z'_1};$$

$$I_1 \approx \frac{\underline{U}_1}{Z_x} + \frac{\underline{U}_1}{Z_k + Z'_1}; \quad \underline{U}_2 = \frac{-\underline{U}_1 Z'_1}{Z_k + Z'_1}.$$

Параметры схемы замещения Z_k , Z_x могут быть найдены по опытным (§ 22.5 и 22.6) или

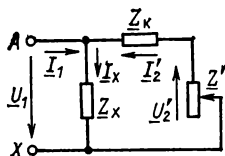


Рис. 22.10. Упрощенная схема замещения трансформатора

паспортным данным трансформатора для одной фазы каждой из его обмоток:

$$I_x = \frac{i_0 I_{1ном}}{100}, \quad r_0 = \frac{P_x}{I_x^2};$$

$$Z_0 = \frac{U_{1ном}}{I_x};$$

$$u_a = \frac{P_x}{10^3 S_{ном}} 100; \quad u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2};$$

$$x_k = \frac{u_p U_{1ном}}{100 I_{1ном}}; \quad r_k = \frac{u_a U_{1ном}}{100 I_{1ном}};$$

$$Z_k = \frac{u_k U_{1ном}}{100 I_{1н}}$$

$$(i_0, u_a, u_p, u_k - \text{в } \%; \quad P_x, P_k - \text{в Вт};$$

$$I_{1н}, I_x - \text{в А}; \quad U_{1ном} - \text{в В};$$

$$r_k, x_k, Z_k, Z_0 - \text{в Ом}; \quad S_{н} - \text{в кВ} \cdot \text{А}).$$

22.8. ИЗМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Изменением напряжения двухобмоточного трансформатора называется арифметическая разность между номинальным вторичным напряжением при холостом ходе и напряжением на зажимах вторичной обмотки при номинальном вторичном токе, номинальной частоте, заданном коэффициенте мощности и номинальном напряжении на зажимах первичной обмотки. Изменение напряжения ΔU выражается в процентах номинального вторичного напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_{2ном} - U_2}{U_{2ном}} 100.$$

При нагрузке током $I_2 = \beta I_{2ном}$ и заданном $\cos \varphi_2$ изменение напряжения

$$\Delta U = \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2}{200} \times$$

$$\times (u_p \cos \varphi_2 - u_a \sin \varphi_2)$$

или

$$\Delta U \approx \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2).$$

Напряжение на выводах вторичной обмотки

$$U_2 = U_{2ном} \left(1 - \frac{\Delta U}{100} \right).$$

Суммарные потери трансформатора при номинальном режиме принимаются равными сумме потерь холостого хода P_x , кВт, и потерь короткого замыкания P_k , кВт: $\Sigma P_{\Sigma} \approx P_x + P_k$. При любом другом режиме при $U_1 = U_{1ном}$; $f = f_{ном}$ и при токе $I_2 = \beta I_{2ном}$ суммарные потери

$$\Sigma \approx P_x + \beta^2 P_k.$$

Потребление реактивной мощности трансформатором

$$Q = \left(\frac{i_0}{100} + \beta \frac{u_p}{100} \right) S_{ном}.$$

Номинальный КПД трансформатора при номинальном режиме и при $\cos \varphi_2 = 1$

$$\eta = \left(1 - \frac{P_k + P_x}{S_{ном} + P_k + P_x} \right) \cdot 100.$$

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	

Схемы соединения обмоток			Диаграммы векторов ЭДС			Условные обозначения
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН и СН	НН	ВН и СН	Н/Н	

Рис. 22.11. Схемы и группы соединения обмоток двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов. Для обеих обмоток вид схем дан со стороны ВН

При нагрузке током $I_2 = \beta I_{2\text{ном}}$ и заданном $\cos \varphi_2$

$$\eta = \left(1 - \frac{P_x + \beta^2 P_R}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_R} \right) 100.$$

22.9. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК

Параллельной работой двух или нескольких трансформаторов называется работа при параллельном соединении не менее чем двух основных обмоток одного из них с таким же числом основных обмоток другого трансформатора (других трансформаторов).

При параллельном соединении одноименные зажимы трансформаторов присоединяются к одному и тому же проводу сети.

В целях правильного распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям параллельная работа двухобмоточных трансформаторов допускается при:

1) равенстве номинальных первичных и вторичных напряжений (допускается разность коэффициентов трансформации не более $\pm 0,5\%$);

2) тождественности групп соединения обмоток;

3) равенстве напряжений короткого замыкания (допускается отклонение не более чем на $\pm 10\%$ от средней величины).

При несоблюдении первого и второго условий в обмотках трансформаторов возникают уравнильные токи, которые в отдельных случаях, особенно при несовпадении групп, могут достигнуть величины тока полного короткого замыкания. Несоблюдение третьего условия приводит к тому, что общая нагрузка распределяется между трансформаторами не пропорционально их номинальным мощностям.

Рекомендуется, чтобы отношение номинальных мощностей параллельно работающих трансформаторов не превышало 3:1.

Распределение общей нагрузки S , кВ·А, между n работающими параллельно трансформаторами

$$S_1 = \beta_1 S_{1\text{ном}}; \quad S_2 = \beta_2 S_{2\text{ном}}; \dots; \\ S_n = \beta_n S_{n\text{ном}},$$

где

$$\beta_1 = \frac{S}{u_{K1} K}; \quad \beta_2 = \frac{S}{u_{K2} K}; \dots; \beta_n = \frac{S}{u_{Kn} K};$$

$$K = \Sigma \frac{S_{\text{ном}}}{u_K} = \frac{S_{1\text{ном}}}{u_{K1}} + \frac{S_{2\text{ном}}}{u_{K2}} + \dots + \frac{S_{n\text{ном}}}{u_{Kn}}.$$

Группа соединения обмоток трансформатора характеризуется угловым смещением векторов линейных ЭДС обмотки НН (в трехобмоточном трансформаторе также СН) по отношению к векторам линейных ЭДС обмотки ВН (рис. 22.11). Группа обозначается числом, которое следует умножить на 30° (угловое

смещение, принятое за единицу) для получения угла смещения в градусах. Угол смещения всегда отсчитывается от вектора линейной ЭДС ВН по часовой стрелке до одноименного вектора ЭДС НН (или СН).

22.10. НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНЫХ ДВУХОБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трехфазный трансформатор может быть нагружен несимметричной нагрузкой, когда по отдельным фазам протекают разные по значению токи. Такая нагрузка вызывает изменение фазных напряжений трансформатора и поэтому является нежелательной для трансформатора и питающихся от него потребителей энергии.

При соединении обмоток по схемам Y/Y , Y/Δ , Δ/Y и Δ/Δ составляющая нулевой последовательности в первичных и вторичных токах отсутствует и каждую фазу трансформатора при несимметричных нагрузках можно рассматривать независимо, как однофазный трансформатор.

Если вторичная обмотка соединена в звезду или зигзаг с нулевым проводом или заземленной нейтралью, то во вторичной обмотке при несимметричной нагрузке может протекать ток нулевой последовательности. В этом случае при схеме соединения первичной обмотки Δ или Y_n ток нулевой последовательности возникает и в первичной обмотке, а при схеме Y или зигзаг ток нулевой последовательности в первичной обмотке возникнуть не может и возникает магнитное поле, созданное током нулевой последовательности и замыкающееся вне магнитопровода трансформатора от ярма к ярму. При наличии третьей обмотки, соединенной по схеме Δ , ток нулевой последовательно-

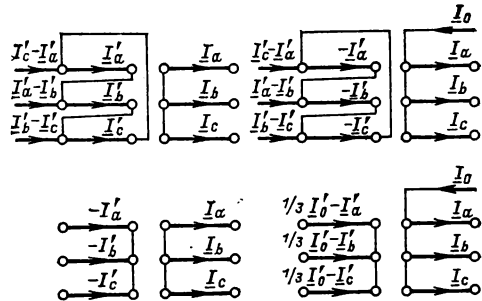


Рис. 22.12. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов

сти существенно уменьшается. Распределение токов при некоторых схемах соединения обмоток — по рис. 22.12.

22.11. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор, имеющий три основные, гальванически не связанные обмотки, называется трехобмоточным. Мощности трех обмо-

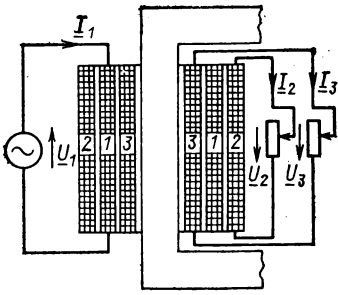


Рис. 22.13. Схема трехобмоточного трансформатора

ток силового трехобмоточного трансформатора обычно относятся как 100 : 100 : 100 % или 100 : 100 : 67 %. Применение трехобмоточных трансформаторов позволяет уменьшить первоначальную стоимость установки по сравнению с эквивалентной по передаваемым мощностям группой двухобмоточных трансформаторов (рис. 22.13).

За номинальную мощность трехобмоточного трансформатора принимается номинальная мощность его наиболее мощной обмотки, параметры u_k , ΔU , i_0 принято относить к этой же обмотке, а токи, напряжения и сопротивления других обмоток приводить к числу витков той же обмотки с наибольшей мощностью (при равенстве мощностей — к обмотке высшего напряжения). Приведенные величины не снабжаются никакими дополнительными знаками или индексами.

При выводе уравнений трехобмоточного трансформатора обычно принимают намагничивающий ток $I_0 \approx 0$, т. е.

$$I_1 + I_2 + I_3 \approx 0.$$

Схема замещения — по рис. 22.14, а, векторная диаграмма — по рис. 22.14, б.

Для определения параметров схемы замещения трехобмоточного трансформатора производятся три опыта короткого замыкания, соответствующие трем возможным парным сочетаниям обмоток: между 1-й и 2-й обмотками, 1-й и 3-й обмотками и 2-й и 3-й обмотками, при которых измеряются напряжения короткого замыкания u_{k12} , u_{k13} и u_{k23} и потери короткого замыкания P_{k12} , P_{k13} и P_{k23} и определяются Z_{k12} , Z_{k13} , Z_{k23} . Все сопротивления здесь и до конца параграфа 22.11 рассчитываются для одной фазы обмотки по фазным значениям U , I , S , P_k (S — в В·А; P_k — в Вт).

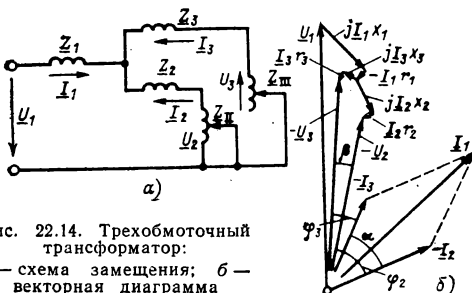


Рис. 22.14. Трехобмоточный трансформатор: а — схема замещения; б — векторная диаграмма

Основное уравнение.

$$U_1 = -I_1 Z_1 = -(U_2 + I_2 Z_2) = -(U_3 + I_3 Z_3);$$

где

$$Z_1 = 0,5 (Z_{k12} + Z_{k13} - Z_{k23});$$

$$Z_2 = 0,5 (Z_{k12} + Z_{k23} - Z_{k13});$$

$$Z_3 = 0,5 (Z_{k13} + Z_{k23} - Z_{k12});$$

$$Z_{k12} = r_{k12} + jx_{k12};$$

$$Z_{k13} = r_{k13} + jx_{k13};$$

$$Z_{k23} = r_{k23} + jx_{k23};$$

$$r_{k12} = \frac{u_{k12} U_{\text{ном}}}{100 I_{\text{ном}}}; \quad r_{k13} = \frac{u_{k13} U_{\text{ном}}}{100 I_{\text{ном}}};$$

$$r_{k23} = \frac{u_{k23} U_{\text{ном}}}{100 I_{\text{ном}}}; \quad r_{k12} = \frac{P_{k12}}{I_{\text{ном}}^2};$$

$$r_{k13} = \frac{P_{k13}}{I_{\text{ном}}^2}; \quad r_{k23} = \frac{P_{k23}}{I_{\text{ном}}^2};$$

$$x_{k12} = \sqrt{Z_{k12}^2 - r_{k12}^2}; \quad x_{k13} = \sqrt{Z_{k13}^2 - r_{k13}^2}$$

$$x_{k23} = \sqrt{Z_{k23}^2 - r_{k23}^2}.$$

При этом P_{k12} , P_{k13} , P_{k23} , u_{k12} , u_{k13} и u_{k23} определены при токах

$$I_{1к} = I_{\text{ном}}, \quad I_{2к} = I_{\text{ном}}/\alpha_{12}, \quad I_{3к} = I_{\text{ном}}/\alpha_{13},$$

где

$$\alpha_{12} = S_{2\text{ном}}/S_{1\text{ном}}; \quad \alpha_{13} = S_{3\text{ном}}/S_{1\text{ном}}.$$

Эквивалентные активные сопротивления схемы замещения трехобмоточного трансформатора могут быть определены по техническим данным трансформатора.

Для обмоток с мощностью 100 %:
для обмотки ВН

$$r_{100} \approx 0,6 \frac{P_k U_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}} I_{\text{ном}}},$$

для обмоток СН и НН

$$r_{100} \approx 0,4 \frac{P_k U_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}} I_{\text{ном}}}.$$

Для обмоток с мощностью 67 % $r_{67} = 1,5 r_{100}$.

Изменение напряжения для трехобмоточных трансформаторов может быть определено для любого заданного распределения нагрузки между обмотками по схеме замещения рис. 22.14, а.

Для трехобмоточных трансформаторов в каталогах обычно указываются потери короткого замыкания P_k для того из двух случаев допустимой 100 %-ной нагрузки обмоток ВН и СН или НН в двухобмоточном режиме, который дает максимальное значение P_k . При любом трехобмоточном режиме, когда обмотка ВН нагружена не более чем на 100 % и арифметическая сумма нагрузок обмоток СН и НН

не превышает нагрузку обмотки ВН, действительные потери P_k не превышают каталожного значения P_k .

Точный расчет P'_k для различных режимов нагрузки трехобмоточного трансформатора возможен лишь при знании активных сопротивлений и токов всех его обмоток. Приближенно P'_k при известном распределении мощностей между тремя обмотками могут быть найдены по формуле

$$P'_k \approx P_k \left[\alpha_1 \left(\frac{S_1}{S_{1ном}} \right)^2 + \alpha_2 \left(\frac{S_2}{S_{2ном}} \right)^2 + \alpha_3 \left(\frac{S_3}{S_{3ном}} \right)^2 \right],$$

где P_k — максимальное из двух значений потерь короткого замыкания при нагрузках 100 % ВН—СН или 100 % ВН—НН; S_1 (ВН), S_2 , S_3 (СН и НН) — мощности обмоток при данном режиме работы; $S_{1ном}$, $S_{2ном}$, $S_{3ном}$ — номинальные мощности соответствующих обмоток; α_1 , α_2 , α_3 — коэффициенты, показывающие, какая доля общих потерь приходится на каждую из обмоток при нагрузке каждой из обмоток ее номинальной мощностью.

Если α_1 , α_2 и α_3 не известны, то можно ориентировочно принять $\alpha_1=0,6$ (ВН), α_2 и $\alpha_3=0,4$ (СН и НН) при трех обмотках, рассчитанных на 100 % номинальной мощности, и $\alpha \approx 0,3$ для обмотки, рассчитанной на 67 %.

22.12. ТРАНСФОРМАТОРЫ С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ОБМОТКАМИ¹

В некоторых случаях с целью создания более рациональных условий коммутации электрических станций одна из обмоток трансформатора разделяется на две или большее число гальванически не связанных частей, суммарная номинальная мощность которых равна номинальной мощности трансформатора, а напряжения короткого замыкания которых относительно другой обмотки практически равны между собой, так что эти части допускают независимую друг от друга нагрузку или питание. Такие обмотки, обычно обмотки низшего напряжения, называются расщепленными. Расположение частей расщепленной обмотки, предназначенной для питания двух независимых сетей, — на стержне магнитной системы по рис. 22.3, схема соединения обмоток трехфазного трансформатора — по рис. 22.15. При коротком замыкании в цепи одной из частей расщепленной обмотки в обмотках трансформатора возникают токи и напряжения существенно меньшие, чем в том же трансформаторе с нерасщепленной обмоткой низшего напряжения.

Такие трансформаторы в первом приближении можно рассматривать как два независимых трансформатора 1—2 и 3—4, питаемых от общей сети. При более точных расчетах

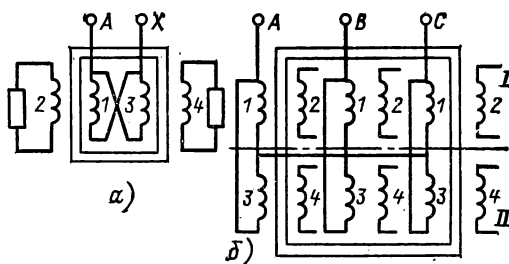


Рис. 22.15. Однофазный (а) и трехфазный (б) трансформаторы с расщепленными обмотками

следует пользоваться уравнениями напряжений

$$\begin{aligned} U_2 &= -U_1 - I_2 Z_{k12} [1 - \xi (1 - \beta_{42})]; \\ U_4 &= -U_3 - I_4 Z_{k34} [1 - \xi (1 - \beta_{24})], \end{aligned}$$

где Z_{k12} , Z_{k34} — сопротивления короткого замыкания соответствующих пар обмоток; $\xi = Z_{k12}/4Z_{k13} = Z_{k34}/4Z_{k13}$ — комплексный коэффициент, имеющий весьма малую мнимую составляющую и измеряемый обычно сотыми долями единицы, причем в трехфазных трансформаторах он несколько больше, чем в однофазных:

$$\beta_{42} = I_4/I_2; \quad \beta_{24} = I_2/I_4.$$

При коротком замыкании на выводах одной из вторичных обмоток, например 4, напряжение на выводах другой обмотки 2 несколько снижается и равно

$$U_2 = (-U_2 - I_2 Z_{k12}) \frac{1 - 2\xi}{1 - \xi}.$$

В повышающих трансформаторах в ряде случаев обмотку НН расщепляют на две или три обмотки, размещенные на разных стержнях общего магнитопровода и питаемые от отдельных генераторов (рис. 22.16).

Обмотки ВН на всех стержнях соединяются при этом параллельно. Такой трансформатор также с достаточной точностью можно рассматривать как два или три независимых параллельно включенных трансформатора. Влияние обмоток одного стержня на обмотки других стержней весьма незначительно, особенно в тех случаях, когда для снижения высоты трансформатора применяют бронестержневую разветвленную конструкцию магнитопровода,

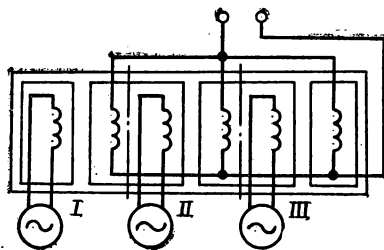


Рис. 22.16. Повышающий однофазный трансформатор с расщепленной обмоткой

¹ § 22.12 и 22.13 написаны Г. Н. Петровым при участии П. М. Тихомирова.

22.13. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Преобразование переменного напряжения, его повышение или понижение во многих случаях более экономично может быть осуществлено путем применения автотрансформатора. В отличие от трансформатора в автотрансформаторе для преобразования напряжения используется не только магнитная связь обмоток, но и их прямое или встречное последовательное соединение. Принципиальные схемы однофазного автотрансформатора и соединения его первичных и вторичных обмоток показаны на рис. 22.17. В случаях рис. 22.17, а и б в процессе преобразования напряжение повышается: $U' > U$; в случаях рис. 22.17, в и г — понижа-

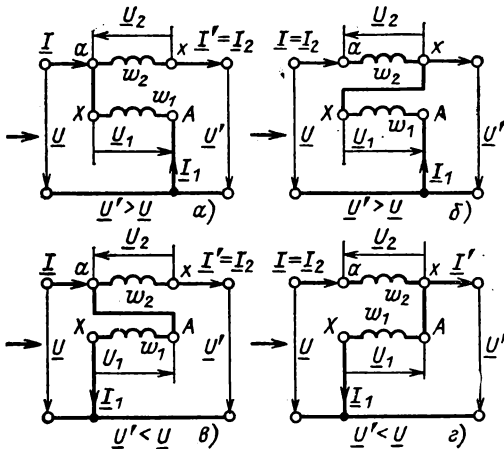


Рис. 22.17. Различные схемы включения автотрансформатора

ется: $U' < U$. При этом, пренебрегая потерями активной и реактивной мощности, приближенно можно считать $UI = U'I'$. Мощность $U'I'$ называют «проходной» в отличие от «расчетной» электромагнитной мощности $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, определяющей размеры автотрансформатора. Расчетная мощность обычно бывает значительно меньше проходной. Например, в случаях рис. 22.17, а и в отношение расчетной мощности к проходной равно

$$\frac{U_2 I_2}{U' I_2} = \frac{U' - U}{U'}$$

В силовых автотрансформаторах обычно применяются схемы с прямым включением обмоток по рис. 22.17, а и г. Схемы с обратным включением обмоток по рис. 22.17, б и в используются только при регулировании напряжения путем реверсирования регулировочной обмотки.

На преобразование напряжения при помощи автотрансформатора затрачивается меньше активных материалов, чем на такое же преобразование, осуществляемое при помощи трансформатора. Это снижает также потери мощности, связанные с процессом преобразования. По расходу активных материалов и снижению потерь применение автотрансформатора тем выгодней, чем меньше напряжение U' отличается от напряжения U . Для всех

Т а б л и ц а 22.1а. Токи обмоток автотрансформатора

Рис. 22.17, а	Рис. 22.17, б	Рис. 22.17, в	Рис. 22.17, г
$I' = I_2$	$I = I_2$	$I' = I_2$	$I = I_2$
$I = -I_1 + I_2$	$I' = I_1 + I_2$	$I = I_1 + I_2$	$I' = -I_1 + I_2$

случаев соединения обмоток однофазного автотрансформатора, показанных на рис. 22.17, имеют место следующие соотношения между напряжениями и токами:

$$\begin{aligned} U' &= U + U_2; & U_1 - I_1 Z_1 &= -E_1; \\ E_2 - I_2 Z_2 &= U_2; & I_1 + I_2 n_{21} &= I_0, \end{aligned}$$

где $n_{21} = w_2/w_1$ и ток I_0 отнесен к числу витков w_1 .

Связь между токами I , I' , I_1 и I_2 дана в табл. 22.1а.

Если приближенно считать $I_0 \approx 0$, то из совместного решения приведенных выше равенств получим

$$U = I Z_{ат}; \quad I' = kI,$$

где $Z_{ат} = k^2(Z + Z_{к21})$ при способах соединений по рис. 22.17, а и в и $Z_{ат} = k^2 Z + Z_{к21}$ при способах соединений по рис. 22.17, б и г; Z — сопротивление нагрузки; $Z_{к21} = Z_1 n_{21}^2 + Z_2$ — сопротивление короткого замыкания обмоток 1 и 2, отнесенное к числу витков w_2 ; коэффициент k — по табл. 22.1б.

Т а б л и ц а 22.1б. Значения коэффициента k

Рис. 22.17, а	Рис. 22.17, б	Рис. 22.17, в	Рис. 22.17, г
$k = \frac{1}{1 + n_{21}}$	$k = 1 - n_{21}$	$k = \frac{1}{1 - n_{21}}$	$k = 1 + n_{21}$

На основе приведенных выше равенств может быть получена схема замещения автотрансформатора, представленная на рис. 22.18,

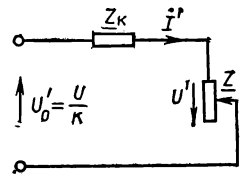


Рис. 22.18. Схема замещения автотрансформатора

причем $Z_k = Z_{к21}$ для случаев рис. 22.17, а и в; $Z_k = Z_{к21}/k^2$ для случаев рис. 22.17, в и г; $U_0 = U/k$ — напряжение при холостом ходе ($I' = 0$).

Напряжение короткого замыкания автотрансформатора

$$u_k = \frac{I_{2ном} Z_{к21}}{U_{2ном}} 100\%;$$

где $U_{2ном}$ и $I_{2ном}$ — номинальные значения напряжения и тока вторичной обмотки.

При $U_{2ном} \ll U_{1ном}$ расчетная мощность значительно меньше «проходной», что выгодно с точки зрения расхода материалов и уменьшения потерь, но при этом увеличивается опасность повреждения автотрансформатора при коротком замыкании.

Для того чтобы автотрансформатор в этом случае мог защищать себя от разрушающего действия токов короткого замыкания, его рассчитывают с таким полем рассеяния, которое обеспечивает получение такого же значения напряжения короткого замыкания по отношению к сети как и у трансформатора той же номинальной мощности.

Силовые автотрансформаторы получили широкое применение для связи сетей смежных напряжений, например 110 и 220, 220 и 500 кВ и т. п. В этих случаях они выполняются на значительные проходные мощности, достигающие до 500 МВ·А и выше. Мощные автотрансформаторы изготавливаются как в однофазном, так и в трехфазном исполнении. В автотрансформаторах, предназначенных для трехфазных сетей, помимо двух основных обмоток, имеющих автотрансформаторную связь и соединенных по схеме звезды с заземленной нейтралью, предусматриваются дополнительные обмотки, обычно низшего напряжения, соединенные треугольником. Наличие таких обмоток обеспечивает компенсацию токов нулевой последовательности, что приводит к выравниванию фазных напряжений при несимметричной нагрузке, а также устраняет появление в фазных напряжениях основных обмоток, ЭДС тройной частоты. Номинальная мощность обмотки низшего напряжения составляет от 20 до 50 % номинальной (проходной) мощности автотрансформатора. Расчет нагрузочных режимов и режимов короткого замыкания трех- и четырехобмоточных трансформаторов, имеющих две обмотки, соединенные по схеме автотрансформатора, может быть проведен на основе общей теории многообмоточных трансформаторов.

Наиболее широкое применение в сетях высокого напряжения получили трехобмоточные автотрансформаторы, у которых обмотки ВН и СН соединены последовательно (в звезду) и образуют автотрансформатор, а обмотка НН, соединенная в треугольник, не имеет электрической связи с двумя другими обмотками.

В дальнейшем обмотка ВН (до выводов СН) обозначается цифрой 1, обмотка СН — цифрой 2 и обмотка НН — цифрой 3.

При расчете нагрузочных режимов следует исходить из данных опыта (сопротивлений) короткого замыкания $Z_{к12}$, $Z_{к13}$, $Z_{к23}$, рассматривая обмотки 1, 2, 3 как отдельные.

Активные и реактивные составляющие этих сопротивлений равны:

$$r_{к12} = r_1 + r_2; \quad x_{к12} = x_1 + x_2;$$

$$r_{к13} = r_1 + r_3; \quad x_{к13} = x_1 + x_3;$$

$$r_{к23} = r_2 + r_3; \quad x_{к23} = x_2 + x_3.$$

Отсюда $r_1 = 0,5(r_{к12} + r_{к13} - r_{к23})$; $x_1 = 0,5(x_{к12} + x_{к13} - x_{к23})$; $r_2 = 0,5(r_{к12} + r_{к23} - r_{к13})$; $x_2 = 0,5(x_{к12} + x_{к23} - x_{к13})$; $r_3 = 0,5(r_{к13} + r_{к23} - r_{к12})$; $x_3 = 0,5(x_{к13} + x_{к23} - x_{к12})$. Здесь все сопротивления приведены к общему числу витков.

Потери активной и реактивной мощностей при любом режиме нагрузки определяются по приведенным токам нагрузки в обмотках I_1 , I_2 , I_3 . Потери активной мощности

$$P = m(I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + I_3^2 r_3),$$

где m — число фаз; потери реактивной мощности

$$Q = m(I_1^2 x_1 + I_2^2 x_2 + I_3^2 x_3).$$

Эти формулы дают достаточно точные результаты даже в тех случаях, когда в автотрансформаторах большой мощности имеют место значительные добавочные потери от магнитных полей рассеяния.

Автотрансформаторы находят также применение в электрических установках, когда требуется длительно или временно повышать или понижать напряжение в отдельных точках сети в пределах до 1,5—2 раз, например для снижения пусковых токов при пуске двигателей большой мощности или при регулировании режимов специальных электрометаллургических печей, а также в разнообразных устройствах проводной и радиосвязи и электронной техники.

При расчете двухобмоточного автотрансформатора следует исходить из его «расчетной» мощности $S_p = U_1 I_1 = U_2 I_2$, отнесенной к одной фазе. При расчете трехобмоточного автотрансформатора следует исходить из условий его работы (повышение или понижение напряжения) и мощностей отдельных обмоток $S_1 = U_1 I_1$; $S_2 = U_2 I_2$ и $S_3 = U_3 I_3$, причем $I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 + I_3 \omega_3 \approx 0$. В этом случае расчетная типовая мощность одной фазы автотрансформатора будет равна

$$S_p = (S_1 + S_2 + S_3)/2.$$

Класс изоляции первичной обмотки определяется номинальным напряжением U_1 . Класс изоляции вторичной обмотки устанавливается по номинальному значению напряжения U , если $U > U'$, или напряжения U' , если $U' > U$. В трехфазных автотрансформаторах класс изоляции выбирается по соответствующим значениям линейных напряжений.

22.14. РЕГУЛИРОВАНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

В соответствии с ГОСТ 11677-85 и стандартами на трансформаторы различных классов напряжений и диапазонов мощностей большинство силовых масляных трансформаторов допускают регулирование, т. е. изменение в соответствии с заданным режимом или стабилизацию напряжения на одной или двух обмотках. Как правило, регулирование напряжения осуществляется путем переключения ответвлений обмотки посредством переключателя. Различают трансформаторы, переключаемые без возбуждения (ПВБ) и регулируемые под нагрузкой (РПН). Переключение без возбуждения допускается только в том, случае, когда все обмотки трансформатора на время переключения отключены от сети, и осуществляется путем перестав-

новки вручную переключателя ответвлений посредством рукоятки, выведенной на крышку бака, или при помощи установленного на трансформаторе привода с дистанционным управлением. Регулирование под нагрузкой осуществляется на возбужденном и нагруженном трансформаторе без перерыва нагрузки и без отключения трансформатора от сети при автоматическом или ручном дистанционном управлении устройством регулирования напряжения под нагрузкой.

В трансформаторах ПБВ напряжение регулируется ступенями $\pm 2 \times 2,5 \%$, т. е. 95; 97,5; 100; 102,5 и 105 % номинального значения. В трансформаторах РПН регулирование осуществляется в пределах $\pm (9 \div 16) \%$ при числе ступеней в положительном и отрицательном направлениях по 6, 8, 9 и 10. Трансформаторы РПН значительно дороже эквивалентных по мощности и другим параметрам трансформаторов ПБВ. Например, масляный трансформатор мощностью 1000 кВ·А РПН в 2,95 раза дороже трансформатора ПБВ.

Сухие трансформаторы мощностью от 160 до 1600 кВ·А класса напряжения 10 кВ выпускаются ПБВ с регулированием на обмотке высшего напряжения четырьмя ступенями (кроме номинального напряжения) $\pm 2 \times 2,5 \%$ номинального напряжения обмотки. Регулирование осуществляется путем перестановки контактных пластин на панели переключения.

Вид переключения ответвлений, расположение ответвлений в линии или в нейтрали трансформатора, число ступеней и номинальные напряжения ответвлений устанавливаются в стандартах или технических условиях на конкретные типы и ряды трансформаторов.

22.15. СХЕМА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА

1. Определение основных электрических параметров

- а) Определение линейных и фазных токов и напряжения обмоток ВН и НН.
- б) Определение испытательных напряжений обмоток.
- в) Определение активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания при заданном значении

2. Определение основных размеров трансформатора

- а) Выбор схемы, конструкции и технологии изготовления магнитной системы.
- б) Выбор марки и толщины листов стали и вида изоляции пластин. Выбор индукции в магнитной системе.
- в) Выбор материала обмоток.
- г) Предварительный выбор конструкций обмоток.
- д) Выбор конструкции и размеров основных изоляционных промежутков главной изоляции обмоток.
- е) Предварительный расчет трансформатора и выбор соотношения основных размеров β с учетом заданных величин u_k , P_k и P_x .

ж) Определение диаметра стержня и высоты обмотки. Определение активного сечения стержня.

3. Расчет обмоток ВН и НН

- а) Выбор типа обмоток ВН и НН.
- б) Расчет обмотки НН.
- в) Расчет обмотки ВН.

4. Определение параметров короткого замыкания

- а) Определение потерь короткого замыкания — основных и добавочных в обмотках, добавочных в элементах конструкции.
- б) Определение напряжения короткого замыкания.
- в) Определение механических сил в обмотках.

5. Окончательный расчет магнитной системы. Определение параметров холостого хода

- а) Определение размеров пакетов и активных сечений стержня и ярма.
- б) Определение массы стержней и ярм и массы стали.
- в) Определение потерь холостого хода.
- г) Определение тока холостого хода.

6. Тепловой расчет и расчет системы охлаждения

- а) Поверочный тепловой расчет обмоток.
- б) Расчет системы охлаждения (бака и радиаторов или охладителей). Определение габаритных размеров трансформатора.
- в) Расчет превышений температуры обмоток и масла над воздухом.
- г) Определение массы масла и основных размеров расширителя.

7. Экономический расчет

- а) Расчет расхода активных и конструктивных материалов.
- б) Ориентировочный расчет себестоимости и цены трансформатора.
- в) Определение приведенных годовых затрат и оценка экономичности рассчитанного трансформатора.

8. Конструирование трансформатора

После выполнения расчета производится разработка конструкции. При разработке конструкции силового трансформатора следует учитывать требования безопасности, установленные ГОСТ 12.2.007.2-75 «Трансформаторы силовые и реакторы электрические. Требования безопасности» (п. 1 и 3).

22.16. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Трехфазный трансформатор. Номинальный (линейный) ток обмотки, А,

$$I = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} U},$$

где S — в кВ·А.

Фазный ток обмотки: $I_\phi = I$ — для соединения в звезду или зигзаг; $I_\phi = I/\sqrt{3}$ — для соединения в треугольник.

Фазное напряжение: $U_\phi = U/\sqrt{3}$ — для соединения в звезду; $U_\phi = U$ — для соединения в треугольник.

При соединении в зигзаг фазное напряжение обмотки равно $U_\phi = U/\sqrt{3}$; это напряжение получается путем геометрического сложения двух напряжений, каждое из которых для трансформатора общего назначения равно

$$\frac{U_\phi}{\sqrt{3}} = \frac{U}{3}.$$

Однофазный трансформатор. Номинальный (линейный) ток, A ,

$$I = \frac{S \cdot 10^3}{U}; \quad I_\phi = I.$$

Напряжение $U_\phi = U$.

Испытательные напряжения выбираются по табл. 22.8 для однофазного испытательного напряжения промышленной частоты для линейного вывода относительно земли и других обмоток.

22.17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

подавляющее большинство современных силовых трансформаторов выполняется с плоской магнитной системой (магнитопроводом) стержневого типа, с вертикально расположенными стержнями, имеющими поперечное сечение в виде ступенчатой фигуры, вписанной в окружность, и с обмотками в виде круговых цилиндров (рис. 22.19).

В последнее время получают распространение также пространственные симметричные магнитные системы. Расчет этих систем см. в [22.2].

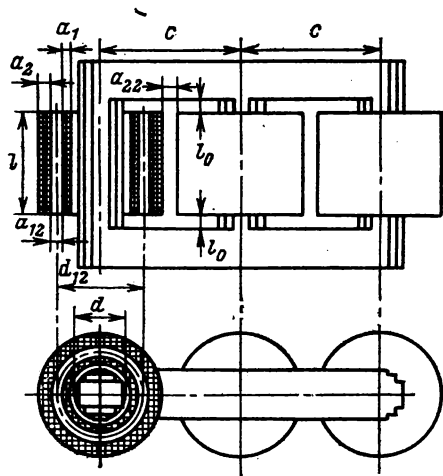


Рис. 22.19. Основные размеры трансформатора

Число ступеней в сечении стержня и коэффициент заполнения площади круга $\pi d^2/4$ площадью $P_{\phi,с}$ ступенчатой фигуры

$$k_{кр} = \frac{P_{\phi,с} \cdot 4}{\pi d^2}$$

могут быть выбраны по табл. 22.2 для масляных и по табл. 22.3 для сухих трансформаторов.

Охлаждающие каналы в сечении стержня масляного трансформатора — продольные по отношению к расположению пластин, шириной 6 мм, при диаметре стержня 0,36—0,48 м — один канал; 0,50—0,60 м — два; 0,63—0,75 м — три; 0,80—0,95 м — четыре; 1,00—1,09 м — пять-шесть; 1,12—1,18 м — семь; 1,22—1,29 м — восемь и 1,32—1,50 м — девять; при диаметрах 0,80—1,50 м — дополнительно один поперечный канал шириной 10 мм.

В стержне сухого трансформатора — один продольный канал шириной 20 мм при диаметрах 0,24—0,26 м и два таких канала при диаметрах 0,28—0,32 м.

Поперечное сечение ярма — многоступенчатое с числом ступеней на 1—2 меньше числа ступеней стержня. Коэффициент увеличения площади сечения ярма по отношению к сечению стержня — 1,01—1,03.

При мощностях трехфазных трансформаторов до 630 кВ·А и диаметре стержня до 0,22 м прессовка набора пластин стержня осуществляется путем забивания деревянных стержней и планок между стержнями магнитной системы и обмоткой НН. При больших мощностях и диаметрах предварительно опресованный стержень стягивается бандажми из стеклотенты. Ярма прессуются ярмовыми балками, стягиваются шпильками, расположенными вне объема ярма.

Выбор марки стали может быть сделан по табл. 22.4. По этой таблице может быть выбрана индукция в стержне.

Электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая сталь изготавливается по ГОСТ 21427.1-83 с электроизоляционным термостойким двусторонним покрытием, выдерживающим отжиг при температуре до $820 \pm 10^\circ\text{C}$. При мощностях трансформаторов до 100 000 кВ·А это изоляционное покрытие обычно считается достаточным. При больших мощностях предпочитают дополнительно покрывать пластины магнитной системы непроводящей пленкой электроизоляционного лака КФ-965 по ГОСТ 15030-78 с последующей сушкой и запеканием при температуре 450—550 °С. Коэффициенты заполнения $k_a = P_c/P_\phi$, т.е. отношение активного сечения стали P_c к площади ступенчатой фигуры стержня или ярма P_ϕ , для различных видов изоляции пластин приведены в табл. 22.5. Коэффициент заполнения сталью, т.е. отношение активного сечения стержня к площади круга с диаметром, равным диаметру стержня трансформатора, равен произведению коэффициентов $k_c = k_{кр} k_a$.

Основными размерами трансформатора принято называть диаметр стержня магнитной системы d ; высоту обмотки l ; диаметр осевого канала между обмотками d_{12} , приближенно равный среднему диаметру витка двух обмоток (рис. 22.19).

Таблица 22.2. Число ступеней в сечении стержня современных трехфазных масляных трансформаторов и коэффициент заполнения $k_{кр}$

Мощность трансформатора, кВ·А	До 16						16	25	40—100	160—630		
Ориентировочный диаметр стержня d , м	До 0,08						0,08	0,09	0,10—0,14	0,16—0,18	0,20	0,22
Число ступеней	1	2	3	4	5	6	6	7	8			
Коэффициент $k_{кр}$	0,636	0,786	0,851	0,861	0,890	0,91—0,92	0,913	0,918	0,928			
Мощность трансформатора, кВ·А	1000—1600			2500—6300			10 000	16 000	25 000	32 000—80 000		
Ориентировочный диаметр стержня d , м	0,24—0,26	0,28—0,30	0,32—0,34	0,36—0,38	0,40—0,42	0,45—0,50	0,53—0,56	0,60—0,67	0,71—0,75			
Число ступеней	8	8	9	9	11	14	15	16	16			
Коэффициент $k_{кр}$	0,925	0,928	0,929	0,913	0,922	0,927	0,927	0,929	0,931			
Мощность трансформатора, кВ·А	100 000—1 000 000											
Ориентировочный диаметр стержня d , м	0,80—0,95			1,00—1,09			1,12—1,18			1,22	1,25—1,36	1,40—1,50
Число ступеней	12			13			15			16	17	18
Коэффициент $k_{кр}$	0,892—0,904			0,899—0,907			0,903—0,909			0,910	0,912—0,913	0,913—0,914

Примечания: 1. Коэффициент $k_{кр}$ приведен с учетом охлаждающих каналов в сечении стержня.

2. При использовании таблицы для трехфазного или однофазного трансформатора его мощность следует умножить на 1,5.

3. До диаметра стержня $d=0,22$ м стержень прессуется расклиниванием с обмоткой, при $d>0,22$ м прессовка осуществляется бандажами.

Таблица 22.3. Число ступеней в сечении стержня современных трехфазных сухих трансформаторов

Мощность трансформатора S , кВ·А	До 10	10	16—100	160—400	630—1000	1600
Ориентировочный диаметр стержня d , м	До 0,08	8	0,09—0,014	0,16—0,22	0,24—0,26	0,28—0,32
Число ступеней	3	4	5—6	7—8	7	8
Коэффициент $k_{кр}$	0,851	0,877	0,915—0,92	0,93—0,935	0,8	0,82
Наличие продольных каналов	Без каналов			Один канал		Два канала

Примечания: 1. Коэффициент $k_{кр}$ учитывает наличие охлаждающих каналов в сечении стержня.
2. При использовании таблицы для однофазного трансформатора его мощность следует умножить на 1,5.

Таблица 22.4. Рекомендуемая индукция в стержнях силовых трансформаторов B_c , Тл

Марка стали по ГОСТ 21427.1-83	Мощность трансформатора, кВ·А		
	до 16	25—100	160 и выше
<i>Масляные трансформаторы</i>			
3411, 3412, 3413 3404, 3405, 3406	1,45—1,50 1,50—1,55	1,50—1,55 1,55—1,60	1,55—1,60 1,55—1,65
<i>Сухие трансформаторы</i>			
3411, 3412, 3413 3404, 3405, 3406	1,35—1,40 1,40—1,45	1,40—1,45 1,50—1,55	1,45—1,55 1,50—1,60

Примечание. В трансформаторах мощностью 100 000 кВ·А и выше иногда допускают индукцию до 1,7 Тл.

Таблица 22.5. Коэффициенты заполнения сечения пакета сечением стали k_3

Толщина стали, мм	Покрытие	
	термостойкое	термостойкое плюс однократная лакировка
0,27	0,94—0,95	0,935—0,945
0,30	0,95—0,96	0,945—0,955
0,35	0,96—0,97	0,955—0,965

Примечание. Большее значение k_3 можно принимать для трансформаторов мощностью от 1000 кВ·А и более при прессовке стержней и ярм бандажими, меньшее значение — для трансформаторов мощностью до 630 кВ·А включительно.

Диаметр стержня, м, предварительно определяется по формуле

$$d = 0,507 \sqrt[4]{\frac{S_{ст} \beta a_p k_p}{f u_p B_c^2 k_c^2}},$$

где $S_{ст}$ — в кВ·А; выбор значения соотношения основных размеров $\beta = \pi d_{12}/l \approx l_b/l$ может быть сделан по табл. 22.6 (l_b — средняя длина витка двух обмоток);

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3};$$

$a_{12} = a'_{12} \cdot 10^{-3}$, где a'_{12} — по табл. 22.10;

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 10^{-2} k \sqrt[4]{S_{ст}},$$

где k — по табл. 22.7; k_p — коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному, $k_p \approx 0,95$; $k_c = k_{кр} k_3$ — по табл. 22.2, 22.3, 22.5.

По диаметру стержня, найденному по формуле, выбирается ближайшее значение из нормализованного ряда диаметров стержня: 0,08; 0,085; 0,09; 0,095; 0,10; 0,105; 0,11; 0,115; 0,12; 0,125; 0,13; 0,14; 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19; 0,20; 0,21; 0,22; 0,225; 0,23; 0,24; 0,245; 0,25; 0,26; 0,27; 0,28; 0,29; 0,30; 0,31; 0,32; 0,33; 0,34; 0,35; 0,36; 0,37; 0,38; 0,39; 0,40; 0,42; 0,45; 0,48; 0,50; 0,53; 0,56; 0,60; 0,63; 0,67; 0,71; 0,75.

После выбора нормализованного диаметра d_n уточняется значение

$$\beta_n = \beta (d_n/d)^4.$$

Активное сечение стержня, м²,

$$P_c = k_{кр} k_3 \frac{\pi d_n^2}{4}.$$

Электродвижущая сила одного витка, В,

$$u_b = 4,44 f B_c P_c.$$

Таблица 22.6. Рекомендуемые значения β

а) Масляные трансформаторы

Мощность, кВ·А	Алюминий			Медь		
	6—10 кВ	35 кВ	110 кВ	6—10 кВ	35 кВ	110 кВ
25—100	1,2—1,6	—	—	1,8—2,4	—	—
160—630	1,2—1,6	1,2—1,5	—	1,8—2,4	1,8—2,4	—
1000—6300	1,3—1,7	1,2—1,6	—	2,0—2,6	1,8—2,4	—
6300—16 000	—	1,1—1,3	1,1—1,3	—	1,7—2,0	1,6—2,0
25 000—80 000	—	—	—	—	1,3—1,6	1,5—1,8

б) Сухие трансформаторы

Мощность, кВ·А	Алюминий		Медь	
	до 1 кВ	6—10 кВ	до 1 кВ	6—10 кВ
10—160	1,1—1,5	—	1,6—2,2	—
160—630	—	1,2—1,6	—	1,8—2,4
1000—16000	—	1,1—1,3	—	1,6—2,0

Примечание. В таблице приведены значения β , рекомендуемые для трехфазных масляных трансформаторов серий 6, 10, 35 и 110 кВ, отвечающих требованиям ГОСТ 12022-76, ГОСТ 11920-73 и ГОСТ 12965-74, и для современных трехфазных сухих трансформаторов. Сталь — марок 3404 и 3405 по ГОСТ 21427.1-83 толщиной 0,35; 0,30 и 0,27 мм; $B_c = 1,6 \div 1,65$ Тл для масляных и $B_c = 1,4 \div 1,6$ Тл для сухих трансформаторов.

Таблица 22.7. Значения коэффициента k

в формуле $\frac{a_1 + a_2}{3} = 10^{-2} k \sqrt{S_{СТ}}$ для масляных трехфазных двухобмоточных трансформаторов ПБВ с медными обмотками и потерями короткого замыкания по ГОСТ

Мощность трансформатора, кВ·А	Класс напряжения, кВ		
	10	35	110
До 250	0,63	0,65—0,58	—
400—630	0,53	—	—
1000—6300	0,51—0,43	0,52—0,48	—
10000—80000	—	0,48—0,46	0,68—0,58

Примечания: 1. Для сухих трансформаторов с медными обмотками мощностью 10—160 кВ·А принимать $k = 0,6 \div 0,74$; для трансформаторов мощностью 160—1600 кВ·А класса напряжения 10 кВ принимать $k = 0,58 \div 0,48$.

2. Для обмоток из алюминиевого провода значение k , найденное из таблицы или по примечанию 1, умножить на 1,25.

3. Для обмоток НН из алюминиевой ленты трансформаторов мощностью 100—1000 кВ·А значения k принимать как для алюминиевого провода.

4. Для трансформаторов, регулируемых под нагрузкой (РПН), значения k , полученные из таблицы, умножить на 1,10.

5. При отклонении заданных потерь короткого замыкания от потерь, установленных соответствующим ГОСТ, на $\pm 10\%$ значение k , полученное из таблицы, умножить соответственно на 0,96 или 1,04.

Средний диаметр осевого канала, м,

$$d_{12} = d_H + 2a_{01} + 2a_1 + a_{12};$$

$$a_{01} = a_{01}' \cdot 10^{-3}, \text{ где } a_{01}' \text{ — по табл. 22.9; } a_1 = \frac{a_1 + a_2}{3}, \text{ где } k = 1,1 \text{ для трансформаторов}$$

мощностью 25—630 кВ·А; $k = 1,4$ для трансформаторов 1000—6300 кВ·А с напряжением на обмотке ВН 10 кВ и 1000—80 000 кВ·А с напряжением на обмотке ВН 35 кВ; для всех трансформаторов с напряжением на обмотке ВН 110 кВ $k = 1,05 \div 1,1$. Высота обмотки $l = \pi d_{12} / \beta$.

22.18. ИЗОЛЯЦИЯ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Изоляция обмоток подразделяется на: 1) главную — изоляцию каждой из обмоток от частей остова и от других обмоток и 2) продольную — изоляцию между различными точками данной обмотки, т.е. между витками, слоями, катушками, элементами емкостной защиты. Аналогично подразделяется изоляция отводов и переключателей.

Изоляция трансформатора должна длительно выдерживать без повреждений электрические, тепловые, механические и физико-химические воздействия, которым она подвергается в эксплуатации. Электрический расчет изоляции производится так, чтобы она могла выдержать прямо-сдаточные и квалификационные испытания, предусмотренные нормами.

Прямо-сдаточные испытания изоляции проводятся заводом-изготовителем согласно ГОСТ 1516.1.2-76. При испытаниях:

а) главной изоляции масляных трансформаторов, обмотки которых имеют один уровень изоляции линейного конца и нейтрали, испытательное напряжение (табл. 22.8) прикладывается между испытуемой обмоткой, замкнутой накоротко, и заземленным баком (в сухих трансформаторах — кожухом), с которым соединяются остова и замкнутые накоротко все прочие обмотки испытуемого трансформатора; длительность испытания 1 мин. Обмотки масляных и сухих трансформаторов с рабочим напряжением до 1 кВ имеют $U_{исп} = 5$ кВ.

Для сухих трансформаторов классов напряжения 3, 6, 10, 15 и 25 кВ одноминутные испытательные напряжения промышленной частоты составляют соответственно 10, 16, 24, 37 и 50 кВ;

б) продольной изоляцией между вводами одной из обмоток прикладывается двойное номинальное напряжение повышенной частоты ($2f$ и более) при разомкнутых остальных обмотках. Длительность испытания 1 мин.

Т а б л и ц а 22.8. Нормированные испытательные напряжения силовых трансформаторов с нормальной изоляцией, кВ, ГОСТ 1516.1-76 и ГОСТ 20690-75 (для класса напряжения 750 кВ)

Класс нап- ряже- ния обмот- ки	Напряжение грозовых импульсов						Напряжение коммутацион- ного импульса				Кратковременные напряжения промыш- ленной частоты				Номинальное напряжение промышленной частоты для испытания внутренней изоляции ли- нейного выво- да ВН относ- тельно земли				
	внутренней изоляции						внешней изоляции				одноименные		при плавном подъеме			внешней изоляции (в сухом состоянии)	линейного вывода отно- сительно земли	между линейными вы- водами разных фаз¹	вывода нейтрал²
	каждого ли- нейного выво- да (поочеред- но)		вывода нейтрал³		каждого ли- нейного выво- да (пооче- редно)		каждого ли- нейного вы- вода от носительного зем- ли		между линейными вы- водами разных фаз¹		линейного вывода отно- сительно земли и и дру- гих обмоток		между линейными вы- водами разных фаз¹			выводами нейтрал²			
	пол- ный им- пульс	сре- занный им- пульс	пол- ный им- пульс	сре- занный им- пульс	пол- ный им- пульс	сре- занный им- пульс	пол- ный им- пульс	сре- занный им- пульс	пол- ный им- пульс	сре- занный им- пульс	пол- ный им- пульс	сре- занный им- пульс	пол- ный им- пульс	сре- занный им- пульс		пол- ный им- пульс	сре- занный им- пульс	пол- ный им- пульс	сре- занный им- пульс
3	44	50	42	50	42	50	42	50	42	50	42	50	42	50	42	50	42	50	
6	68	70	57	70	57	70	57	70	57	70	57	70	57	70	57	70	57	70	
10	80	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	
15	108	120	100	120	100	120	100	120	100	120	100	120	100	120	100	120	100	120	
20	130	150	105	120	150	170	120	150	170	120	150	170	120	150	170	120	150	170	
24	150	170	—	140	170	140	170	140	170	140	170	140	170	140	170	140	170	140	
27	170	195	—	150	195	160	200	160	200	160	200	160	200	160	200	160	200	160	
35	200	225	140	185	225	185	230	185	230	185	230	185	230	185	230	185	230	185	
110	480	550	—	200	550	460	570	460	570	460	570	460	570	460	570	460	570	460	
150	550	600	—	275	600	500	625	500	625	500	625	500	625	500	625	500	625	500	
220	750	835	—	400	835	690	860	690	860	690	860	690	860	690	860	690	860	690	
330	1050	1150	—	—	—	1000	1250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
500	1550	1650	—	—	—	1450	1800	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
750	2100	2250	—	—	—	1950	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1150⁴	2650	2800	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

¹ Для трехфазных трансформаторов.

² Для соединенных в звезду обмоток с полной изоляцией нейтрали при невыведенной нейтрали.

³ Для соединенных в звезду обмоток классов напряжения от 3 до 35 кВ с полной изоляцией нейтрали и для обмоток классов напряжения от 110 до 220 кВ с неполной изоляцией нейтрали, допускающей работу с ее разземлением.

⁴ Для обмоток классов напряжения от 3 до 35 кВ с полной изоляцией нейтрали при испытании приложенным напряжением одновременно с изоляцией линейного вывода и для обмоток классов напряжения от 110 до 220 кВ с неполной изоляцией нейтрали, допускающей работу с ее разземлением.

⁵ По данным ВЭИ.

22.19. ГЛАВНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ
ОБМОТОК. МИНИМАЛЬНО
ДОПУСТИМЫЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ
РАССТОЯНИЯ

Изоляционные расстояния и конструкция главной изоляции обмоток масляных трансформаторов классов напряжения до 35 кВ включительно выбираются по табл. 22.9 и 22.10 согласно рис. 22.20.

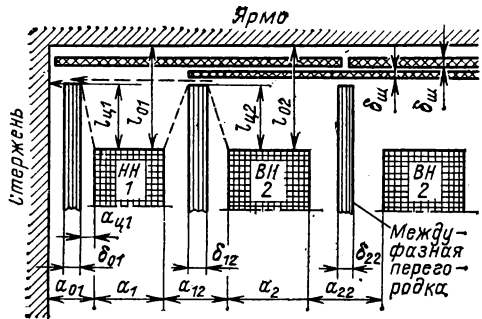


Рис. 22.20. Главная изоляция обмоток для испытательных напряжений от 5 до 85 кВ

Структура и основные размеры главной изоляции обмотки ВН класса напряжения 110 кВ с вводом линейного конца в середину высоты обмотки показаны на рис. 22.21. Главная часть обмотки ВН рассчитана на номинальную мощность. Регулировочная обмотка рассчитана на напряжение, равное половине диапазона регулирования, и включается по ступеням с реверсированием, встречно или согласно с напряжением основной части.

Размеры прессующих колец по рис. 22.21, склеенных из древесно-слоистого материала, $H_k=60$ и 80 мм при мощностях до 25 000 и 40 000—80 000 кВ·А соответственно. Размеры стальных колец $H_k=35$ и 55 мм при тех же мощностях. Для стальных колец расстояние от торца обмотки до кольца составляет 90 мм.

Главная изоляция обмоток сухих трансформаторов выбирается по табл. 22.11 а и 22.11 б согласно рис. 22.22.

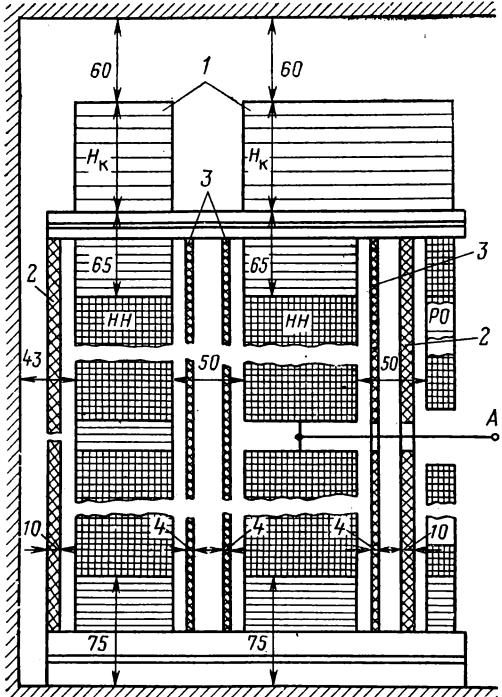


Рис. 22.21. Главная изоляция обмотки ВН класса напряжения 110 кВ с вводом линейного конца в середину высоты обмотки. Испытательное напряжение линейного конца 200 кВ, нейтрали и регулировочной обмотки — 100 кВ:

1 — прессующие кольца обмоток; 2 — бумажно-бакелитовые цилиндры; 3 — цилиндры из электроизоляционного картона

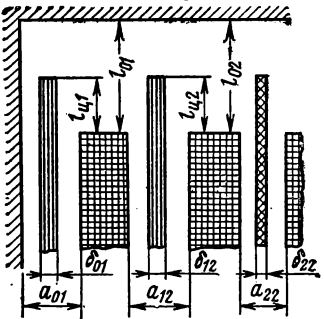


Рис. 22.22. Главная изоляция сухих трансформаторов

Таблица 22.9. Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмоток НН с учетом конструктивных требований. Масляные трансформаторы

Мощность трансформатора S, кВ·А	U _{исп} для НН, кВ	НН от ярма l _{о1} , мм	НН от стержня, мм			
			δ _{о1}	a _{и1}	a _{о1}	l _{и1}
25—50	5	15	Картон 2×0,5	—	4,0	—
400—630*	5	Принимается равным найденному по испытательному напряжению обмотки ВН	Картон 2×0,5	—	5,0	—
1000—2500	5		4,0	6,0	15	18
630—1600	18, 25 и 35		4,0	6,0	15	25
2500—6300	18, 25 и 35		4,0	8,0	17,5	25
630 и выше	45		5,0	10	20	30
630 и выше	55		5,0	13	23	45
Все мощности	85		6,0	19	30	70

* Для винтовой обмотки с испытательным напряжением U_{исп} =5 кВ размеры взять из следующей строки (для мощностей 1000—2500 кВ·А).

Т а б л и ц а 22.10. Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмоток ВН с учетом конструктивных требований. Масляные трансформаторы

Мощность трансформатора S , кВ·А	$U_{исп}$ для ВН, кВ	ВН от ярма, мм		Между ВН и НН, мм		Выступ цилиндра $l_{ц2}$, мм	Между ВН и НН, мм	
		l_{02}	$\delta_{ш}$	a_{12}	δ_{12}		a_{22}	δ_{22}
25—100	18, 25 и 35	20	—	9,0	2,5	10	8,0	—
160—630	18, 25 и 35	30	—	9,0	3,0	15	10	—
1000—6300	18, 25 и 35	50	—	20	4,0	20	18	—
630 и выше	45	50	2,0	20	4,0	20	18	2,0
630 и выше	55	50	2,0	20	5,0	30	20	3,0
160—630*	85 (прим.1)	75	2,0	27	5,0	50	20	3,0
1000—6300	85 (прим.1)	75	2,0	27	5,0	50	30	3,0
10000 и выше	85	80	3,0	30	6,0	50	30	3,0

Примечания: 1. Для цилиндрических многослойных обмоток минимальное изоляционное расстояние $a_{12}=27$ мм. Электростатический экран — с изоляцией 3,0 мм. При расчете диаметра стержня магнитной системы и реактивной составляющей напряжения короткого замыкания принимать $a_{12}=30$ мм.

2. При наличии прессующих колец расстояние до верхнего ярма l_0 принимается увеличенным против данных таблицы для трансформаторов 1000—6300 кВ·А на 45 мм, для двухобмоточных трансформаторов 10 000—63 000 кВ·А — на 60 мм и для трехобмоточных трансформаторов этих мощностей — на 100 мм. Расстояние от нижнего ярма l_0 и в этих случаях выбирается по таблице.

3. В трехобмоточных трансформаторах при $U_{исп}=85$ кВ канал между обмотками СН и НН a_{12} увеличивается от 27 до 36—40 мм для вывода ответвлений от середины обмотки СН (из расчета изолированный опрессованный отвод — 20 мм, цилиндр — 6 мм, канал — 10—14 мм).

Т а б л и ц а 22.11а. Изоляция обмоток ВН сухих трансформаторов, мм

$U_{исп}$ для ВН, кВ	ВН от ярма l_{02}	Между ВН и НН		Между ВН и НН		
		a_{12}	δ_{12}	$l_{ц2}$	a_{22}	δ_{22}
3	15	10	Картон 2×0,5	—	10	—
10	20	15		10	10	2,5
16	45	22		25	25	3,0
24	80	40		40	45	3,0

Т а б л и ц а 22.11б. Изоляция обмоток НН сухих трансформаторов, мм

$U_{исп}$ для НН, кВ	НН от ярма	НН от стержня		
		a_{01}	δ_{01}	$l_{ц1}$
3	15	10	Картон 2×0,5	—
10	30	14		15
16	35	27		30
24	90	40		40

Примечания: 1. Указанные в табл. 22.11а и 22.11б размеры каналов a_{01} и a_{02} являются минимальными с точки зрения изоляции обмоток. Эти размеры должны быть проверены по условиям отвода тепла по табл. 22.14.

2. Для винтовой обмотки НН при $U_{исп}=3÷10$ кВ ставить цилиндр толщиной 3—5 мм и принимать a_{01} не менее 20 мм.

22.20. ПРОДОЛЬНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТОК

Изоляция витков выбирается по табл. 22.12. Междуслойная изоляция применяется только в цилиндрических обмотках масляных трансформаторов (табл. 22.13).

В двухслойной цилиндрической обмотке из прямоугольного провода при напряжении одного слоя не более 0,5 кВ достаточная изоляция обеспечивается в масляном трансформаторе осевым каналом шириной 4 мм или двумя слоями картона по 0,5 мм, а в сухом трансформаторе — осевым каналом не менее 15 мм, при рабочем напряжении слоя более

Т а б л и ц а 22.12. Выбор витковой изоляции

Испытательное напряжение обмотки, кВ	Марка провода	Толщина изоляции на две стороны, мм	Назначение
3—24	ПСД, АПСД, ПСДК и АПСДК	Крупный провод 0,29—0,38 (0,30 и 0,40), прямоугольный 0,27—0,48 (0,45—0,50)	Для сухих пожаробезопасных трансформаторов
5—85	ПЭЛБО	Круглый провод 0,17—0,21 (0,27—0,31) 0,30 (0,40)	Для масляных и сухих трансформаторов
	ПВ и АПБ		
	ПБ и АПБ	Прямоугольный провод 0,45 (0,50)	
200	ПБ и АПБ	Прямоугольный провод 1,20 (1,35)	Для масляных трансформаторов
200	ПБПУ	Прямоугольный провод 1,35	Основные обмотки
		Прямоугольный провод 2,96	Регулировочные обмотки

Примечание. В скобках указаны расчетные размеры провода с учетом допусков.

Таблица 22.13. Нормальная междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках

Суммарное рабочее напряжение двух слоев обмотки, В	Число слоев кабельной бумаги на толщину листов, мм	Выступ междуслойной изоляции на торцах обмотки (на одну сторону), мм
До 1000	2×0,12	10
От 1001 до 2000	3×0,12	16
» 2001 » 3000	4×0,12	16
» 3001 » 3500	5×0,12	16
» 3501 » 4000	6×0,12	22
» 4001 » 4500	7×0,12	22
» 4501 » 5000	8×0,12	22
» 5001 » 5500	9×0,12	22

0,5 кВ и до 3 кВ в масляном трансформаторе — осевым каналом 6—8 мм и двумя слоями картона по 1 мм.

Междукатушечная изоляция в катушечных обмотках масляных трансформаторов классов напряжения до 110 кВ включительно обычно осуществляется радиальными масляными каналами с минимальной высотой канала, мм, $h_k = 2,2 U_k / 1000$, где U_k — рабочее напряжение одной катушки, В.

Размеры горизонтальных масляных каналов проверяются по условиям теплоотдачи — по табл. 22.14. По этой же таблице выбирается междукатушечная изоляция в сухих трансформаторах.

Для повышения электрической прочности при воздействии на обмотку импульсных перенапряжений продольная изоляция начальных и конечных катушек усиливается (табл. 22.15).

Таблица 22.14. Минимальные размеры охлаждающих каналов в обмотках, мм

А. Масляные трансформаторы

Вертикальные каналы				Горизонтальные каналы	
Длина канала, мм	Обмотка—обмотка	Обмотка—цилиндр	Обмотка—стержень	Длина канала, мм	Обмотка—обмотка
До 300	4,0—5,0	4,0	4,0—5,0	До 40	4,0
300—500	5,0—6,0	5,0	5,0—6,0	40—60	5,0
500—1000	6,0—8,0	5,0—6,0	6,0—8,0	60—70	6,0
1000—1500	8,0—10	6,0—8,0	8,0—10	70—80	7,0

Б. Сухие трансформаторы. Выбор размера канала по допустимому превышению температуры и плотности теплового потока на поверхности обмотки q , Вт/м²

Класс изоляции	А	Е—В	Р	Н
Допустимое превышение температуры, °С	60	75—80	100	125
Плотность теплового потока, Вт/м ²				
Вертикальные каналы				
Размер канала, мм:				
7,0	160	230	300	380
10	300	450	600	800
15	380	550	720	950
Горизонтальные каналы				
8,0	280	320	420	580
12	380	420	540	720
16	450	540	720	1000

Таблица 22.15. Изоляция входных витков и катушек, мм

Класс напряжения, кВ	Испытательное напряжение, кВ	Непрерывная катушечная обмотка			
		Первая катушка		Вторая катушка	
		Витки	Вся катушка	Витки	Вся катушка
20	55	0,96 (1,06)	—	—	—
35	85	1,35 (1,50)	—	1,35 (1,50)	—

Примечания: 1. Усиленная изоляция при $U_{исп} = 55$ кВ делается на первой (линейный конец) и последней (нейтраль) катушках обмотки фазы, при $U_{исп} = 85$ кВ — на двух первых и двух последних катушках.

2. В обмотках классов напряжения 20 и 35 кВ два крайних канала между катушками сверху и снизу — не менее 7 мм каждый.

3. В многослойной цилиндрической обмотке класса напряжения 35 кВ с экраном пять последних витков у нейтрали на каждой ступени имеют усиленную изоляцию — один слой лакоткани ЛХММ вполуперекрышку.

4. Изоляция витков дана на две стороны, изоляция катушек — на одну.

5. Вне скобок указана номинальная толщина изоляции витков. Размеры катушки рассчитываются по толщине изоляции, указанной в скобках.

22.21. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ ОБМОТОК

Выбор конструкции обмотки производится с учетом: мощности трансформатора, отнесенной к одному стержню, выбранного металла обмотки — меди или алюминия, тока обмотки одного стержня, номинального напряжения обмотки и сечения витка по табл. 22.16.

Число витков обмотки на фазу

$$w = \frac{U_{\Phi}}{4,44fB_c P_c}; \quad u_b = \frac{U_{\Phi}}{w}.$$

Средняя плотность тока в обмотках ВН и НН (предварительно):

для медного провода, МА/мм²,

$$J_M = 0,746 \cdot 10^4 k \frac{P_K u_b}{Sd_{12}};$$

для алюминиевого провода

$$J_a = 0,463 \cdot 10^4 k \frac{P_K u_b}{Sd_{12}},$$

где k — по табл. 22.17. Если P_K не задано, то J выбирается по табл. 22.18. Далее определя-

ется сечение витка в мм²: $P'_b = I/10^{-6}J$, по сортаменту обмоточного провода подбираются сечение, число и размеры параллельных проводов для обмоток НН и ВН и определяется действительная плотность тока

$$J = I/P_b,$$

где $P_b = P'_b \cdot 10^{-6}$. Затем производится размещение каждой обмотки — рассчитываются числа их витков, число и расположение слоев в цилиндрических обмотках, число ходов в винтовых и катушек в непрерывных катушечных обмотках, числа и размеры охлаждающих каналов.

Для получения заданных параметров короткого замыкания осевые размеры (высоты) обеих обмоток должны быть равны ранее найденному значению l . Радиальные размеры обмоток a_1 и a_2 определяются по размерам сечения провода и числу слоев и междуслойной изоляции в цилиндрических обмотках; по числу параллельных проводов в одном ходу винтовых обмоток и числу витков в катушке непрерывных катушечных обмоток. Все эти размеры выражаются в метрах.

Затем определяются поверхности охлаждения обмоток P_o , м², с учетом закрытия части

Т а б л и ц а 22.16. Обычные пределы применения различных типов обмоток масляных трансформаторов

Тип обмотки	Применение на стороне		Материал обмоток	Пределы применения включительно				Число параллельных проводов	
	главное	возможное		по мощности трансформатора, кВ·А	по току обмотки стержня, А	по напряжению, кВ	по сечению витка, мм ²	от	до
Цилиндрическая одно- и двухслойная из провода прямоугольного сечения	НН	ВН	Медь	До 630	От 15—18 до 800	До 6	От 5,04 до 250	1	4—8
			Алюминий	До 630	От 10—13 до 600—650	До 6	От 6,39 до 300		
Цилиндрическая многослойная из провода прямоугольного сечения	ВН	НН	Медь	От 630 до 80000	От 15—18 до 1000—1200	10 и 35	От 5,04 до 400	1	4—8
			Алюминий	До 16000—25000	От 10—13 до 1000—1200	10 и 35	От 6,30 до 500		
Цилиндрическая многослойная из провода круглого сечения	ВН	НН	Медь	До 630	От 0,5 до 80—100	До 35	От 1,094 до 42,44	1	2
			Алюминий	До 630	От 2—3 до 125—135	До 35	От 1,37 до 50,24	1	1
Непрерывная катушечная из провода прямоугольного сечения	ВН	НН	Медь	От 160 и выше	От 15—18 и выше	От 3 до 110—220	От 5,04 и выше	1	3—5
			Алюминий	От 100	От 10—13 и выше	От 3 до 110—220	От 6,39 и выше		
Винтовая одно- и двухходовая	НН	—	Медь	От 160 и выше	От 300 и выше	До 35	От 75—100 и выше		Без ограничения
			Алюминий	От 100 и выше	От 150—200 и выше	До 35	От 75—100 и выше	4	

Таблица 22.17. Значения k для трехфазных масляных трансформаторов

Мощность трансформатора, кВ·А	До 100	160—630	1000—6300	10 000—16 000	25 000—63 000	80 000—10 0000
k	0,97	0,96—0,93	0,93—0,85	0,84—0,82	0,81—0,78	0,77—0,75

Примечание. Для сухих трансформаторов мощностью 10—160 кВ·А принимать $k=0,99 \div 0,96$, для трансформаторов мощностью 250—1600 кВ·А $k=0,92 \div 0,86$.

Таблица 22.18. Средняя плотность тока J , МА/м², для современных трансформаторов с потерями короткого замыкания по ГОСТ

а) Масляные трансформаторы

Мощность трансформатора, кВ·А	25—40	63—630	1000—6300	10 000—16 000	25 000—80 000
Медь	1,8—2,2	2,3—3,5	2,2—3,5	2,0—3,5	2,0—3,5
Алюминий	1,1—1,8	1,2—2,5	1,5—2,6	1,5—2,7	—

б) Сухие трансформаторы

Мощность трансформатора, кВ·А	10—160; 0,5 кВ		160—1600; 10 кВ	
	Внутренняя обмотка	Наружная обмотка	Внутренняя обмотка	Наружная обмотка
Медь	2,0—1,4	2,2—2,8	2,0—1,2	2,0—2,8
Алюминий	1,3—0,9	1,3—1,8	1,4—0,8	1,4—2,0

этих поверхностей различными изоляционными деталями. Массы металла, кг, каждой обмотки (для обмоток ВН отдельно для средней и высшей ступеней) определяются:

для медных обмоток $G_m = 28 \cdot 10^3 c D_{cp} w P_b$, для алюминиевых обмоток $G_a = 8,47 \times 10^3 c D_{cp} w P_b$, где c — число активных стержней; w — число витков (для ВН на соответствующей ступени); D_{cp} — средний диаметр витка, м.

Масса металла отводов, кг: для медного провода $G_{отв,м} = 8,9 l_{отв} P_{отв} \cdot 10^3$; для алюминиевого провода $G_{отв,а} = 2,7 l_{отв} P_{отв} \cdot 10^3$, где $l_{отв} = 7,5 l$ м для соединения обмоток в звезду и $l_{отв} = 14 l$ м для соединения в треугольник; $P_{отв} = P_b$, м².

22.22. РАСЧЕТ ОБМОТОК НН

1. Цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода (рис. 22.23) применяется преимущественно в трансформаторах мощностью не более 630 кВ·А. Обмотка может применяться при больших мощностях, если в процессе производства она подвергается специальной технологической обработке, обеспечивающей механическую прочность при коротких замыканиях. Обмотка выполняется: при мощностях до 16—25 кВ·А — в один-два слоя, при 40—630 кВ·А — в два слоя, соединяемых последовательно. Число параллельных проводов — до восьми, намотка предпочтительно плашмя, менее желательно — на ребро; все параллельные провода должны иметь одинаковые размеры и площади поперечных сечений.

При намотке на ребро отношение сторон поперечного сечения провода должно быть не менее 1,3 и не более 3. Для обеспечения крепления крайних витков слоя и учета отклоне-

ний в толщине изоляции провода расчетную сумму высот проводов в слое выдерживают на 5—15 мм менее высоты обмотки.

2. Винтовая обмотка (рис. 22.24) применяется только как обмотка НН в трансформаторах с медными обмотками мощностью на один стержень от 160 кВ·А и выше при токе не менее 300 А (при алюминиевых обмотках — от 100 кВ·А и выше при токе не менее 150—200 А). Верхний предел по мощности и току практически не ограничен. В изготовлении она несколько дороже цилиндрической обмотки. Минимальное число параллельных проводов 4, все параллельные провода должны иметь одинаковые размеры и площадь поперечного сече-

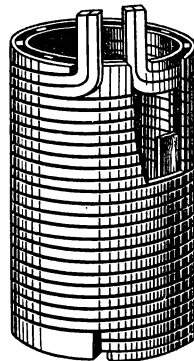


Рис. 22.23. Двухслойная цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода

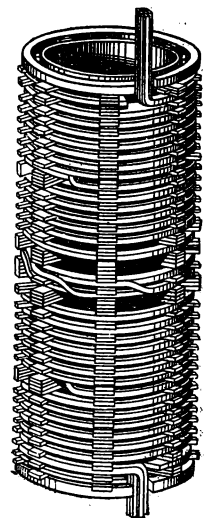


Рис. 22.24. Одноходовая винтовая обмотка

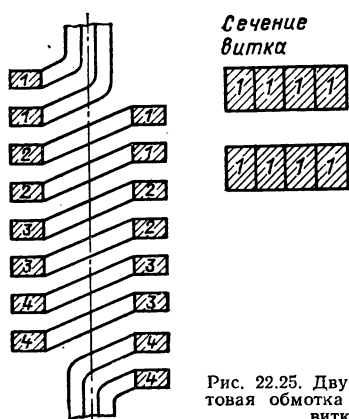


Рис. 22.25. Двухходовая винтовая обмотка из четырех витков

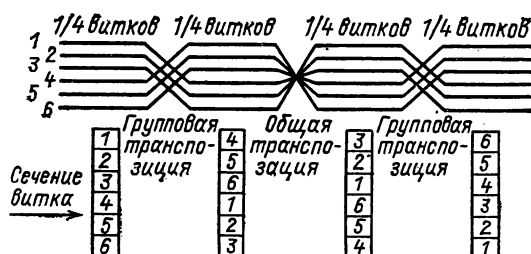


Рис. 22.26. Принципиальная схема транспозиций в одноходовой обмотке при четном числе параллельных проводов

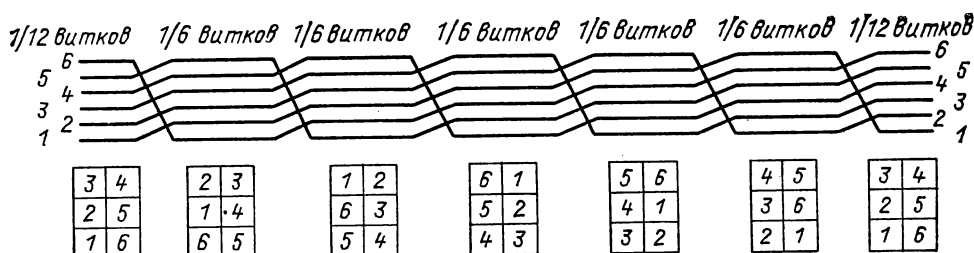


Рис. 22.27. Принципиальная схема равномерно распределенной транспозиции в двухходовой обмотке из шести параллельных проводов

ния, намотка — только плашмя. Подобно резьбе винта может быть одноходовой (рис. 22.24), двухходовой (рис. 22.25), в отдельных случаях — четырехходовой. При концентричном расположении обмоток ВН и НН (СН) обязательна транспозиция параллельных проводов — общая и групповая по схеме рис. 22.26 для одноходовой или одного хода многоходовой обмотки или равномерно распределенная по схеме рис. 22.27 для двухходовой обмотки.

При определении высоты обмотки учитывают, что: а) каждая общая и групповая транспозиция увеличивает высоту обмотки на высоту витка и канала; равномерно распределенная транспозиция высоты обмотки не увеличивает; б) действительная общая высота всех горизонтальных каналов на 4—6 % менее расчетной высоты за счет усадки междукатушечных прокладок после сушки.

22.23. РАСЧЕТ ОБМОТОК ВН

В масляных трансформаторах мощностью 25—200 000 кВ·А с переключением без возбуждения (ПБВ) ГОСТ 12022-76, ГОСТ 11920-73 и ГОСТ 12965-74 предусмотрено выполнение в обмотках ВН (и СН) четырех ответвлений на +5; +2,5; —2,5 и —5 % номинального напряжения помимо основного ответвления с номинальным напряжением. Также выполняются ответвления в сухих трансформаторах. Переключение ответвлений производится переключателями с выведенными из бака рукоятками управления при отключении всех обмоток трансформатора от сети. Схемы ответвлений — по рис. 22.28.

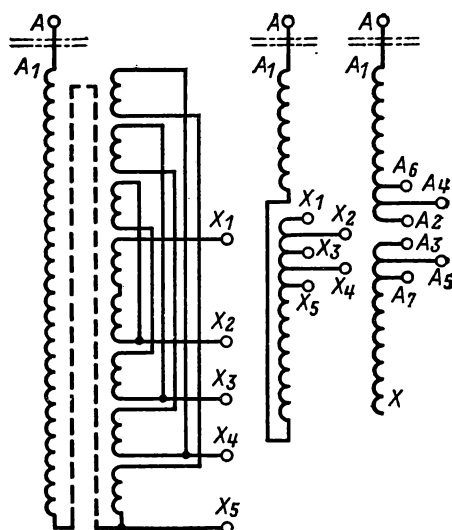


Рис. 22.28. Схемы выполнения ответвлений в обмотках ВН при переключении без возбуждения ($\pm 2 \times 2,5\%$)

Число витков в обмотке ВН:

Верхние ступени напряжения

Средняя ступень напряжения

Нижние ступени напряжения

$$\omega_2 + 0,05\omega_2$$

$$\text{и } \omega_2 + 0,025\omega_2$$

$$\frac{U_{\Phi 2}}{U_{\Phi 1}}$$

$$\omega_2 - 0,025\omega_2$$

$$\text{и } \omega_2 - 0,05\omega_2$$

Число катушек (за исключением многослойной цилиндрической обмотки) выбирается так, чтобы: 1) число катушек было четным; 2) рабочее напряжение катушки не превосходило 800—1000 В; 3) при номинальном напряжении 20 кВ и выше все витки, служащие для регулирования напряжения, и витки с усиленной изоляцией располагались в отдельных катушках.

1. Многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода (рис. 22.29). Основное применение — на стороне ВН, в отдельных случаях НН, трансформаторов с мощностью на один стержень не более 250 кВ·А (по соображениям механической прочности), при классе изоляции не выше 35 кВ. В изготовлении дешевле непрерывной обмотки. Число параллельных проводов (равного сечения) — не более двух, транспозиция проводов не применяется. Междуслойная изоляция — кабельная бумага — по табл. 22.13. При $S > 25 + 35$ кВ·А обмотка разделяется на две концентрические катушки с каналом между ними; число слоев наружной катушки на стороне ВН — от 3/5 до 2/3 общего числа слоев; на стороне НН — 1/2. При напряжении 35 кВ обмотка снабжается частичной емкостной защитой — экраном.

2. Непрерывная катушечная обмотка (рис. 22.30) обладает высокой механической и электрической прочностью, применяется в основном на стороне ВН при $S_{ст} > 100$ кВ·А при напряжении от 3 до 110—220 кВ и выше, при токе от 15—18 А и выше для медных обмоток и 10—13 А и выше для алюминиевых обмоток. Верхний предел применения по мощности практически не ограничен. Число параллельных проводов (равного сечения) — до 3—5, транспозиция проводов производится при переходе между катушками и дополнительного места не требует. Междукатушечная изоляция — масляные каналы.

При плотностях тока менее 3 МА/м² в медных обмотках и менее 2 МА/м² в алюминиевых обмотках горизонтальные каналы достаточно сделать только между двойными катушками (через две катушки), заменив в двойных катушках масляный канал двумя электрокартонными шайбами 2×0,5 мм.

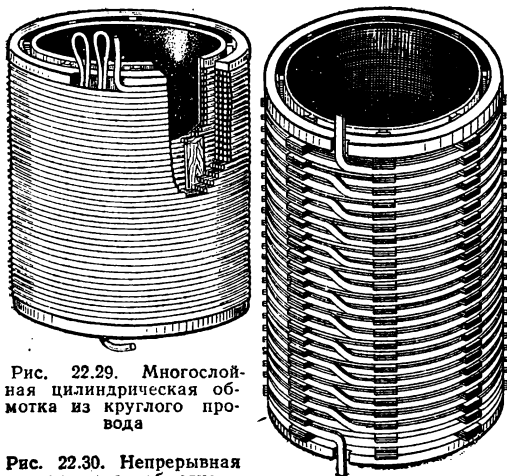


Рис. 22.29. Многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода

Рис. 22.30. Непрерывная катушечная обмотка

Радиальные размеры катушек различного назначения (основные регулировочные, с усиленной изоляцией) должны выдерживаться примерно равными. При определении высоты обмотки учитывается усадка междукатушечных прокладок и шайб после сушки на 4—6 %.

3. Многослойная цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода. Этот тип обмотки находит применение в качестве обмоток ВН и иногда НН в трансформаторах мощностью от 1000 до 63 000—80 000 кВ·А для медных и до 16 000—25 000 кВ·А для алюминиевых обмоток. Число параллельных проводов — до 4—8, все провода имеют одинаковые размеры поперечного сечения, намотка только плашмя, слои соединяются последовательно, охлаждение осуществляется одним — четырьмя осевыми масляными каналами. От импульсных перенапряжений обмотка защищается электростатическими экранами. Для обеспечения механической прочности при коротком замыкании обмотка должна наматываться с механическим поджимом витков в радиальном и осевом направлениях и после изготовления опрессовываться осевыми силами, близкими к силам при установившемся токе короткого замыкания.

22.24. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Потери короткого замыкания P_k состоят из: 1) основных потерь в обмотках НН и ВН (СН) $P_{осн1}, P_{осн2}$; 2) добавочных потерь в обмотках, вызванных полем рассеяния, $P_{д1} = (k_{д1} - 1)P_{осн1}$ и $P_{д2} = (k_{д2} - 1)P_{осн2}$; 3) основных потерь в отводах между обмотками и вводами $P_{отв1}$ и $P_{отв2}$; 4) добавочных потерь в отводах, вызванных полем рассеяния отводов, $P_{отв,д1}$ и $P_{отв,д2}$; 5) потерь в стенках бака и других металлических конструкциях, вызванных полем рассеяния обмоток и отводов, P_6 . Величинами $P_{отв,д1}$ и $P_{отв,д2}$ в силовых трансформаторах общего назначения можно пренебречь.

Значения P_k для масляных и сухих трансформаторов общего назначения регламентированы соответствующими стандартами; допускаются отклонения: у готового трансформатора не более +10 %; в расчете рекомендуется отклонение не более +5 %. Основные потери при температуре 75 °С, Вт:

для обмоток из меди

$$P_{осн,м} = 2,4 \cdot 10^{-12} J^2 G_m,$$

для обмоток из алюминия

$$P_{осн,а} = 12,75 \cdot 10^{-12} J^2 G_a,$$

Основные потери в обмотках сухих трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости F, H, C, Вт, определяются для расчетной температуры +115 °С:

для обмоток из меди

$$P_{осн,м} = 2,72 \cdot 10^{-12} J^2 G_m,$$

для обмоток из алюминия

$$P_{осн,а} = 14,4 \cdot 10^{-12} J G_a,$$

При расчете добавочных потерь в обмотках все линейные размеры проводов a, b, d

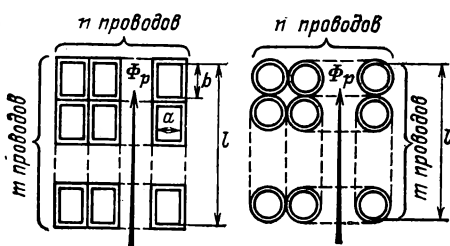


Рис. 22.31. К определению добавочных потерь в обмотках

(рис. 22.31) и высоту обмотки l выражать в метрах. Для этого реальные размеры провода, выраженные в справочных таблицах в миллиметрах, следует умножить на 10^{-3} . Коэффициент $k_p = 0,95$.

Добавочные потери (рис. 22.31) в медных обмотках:

прямоугольный провод

$$k_{д,м} = 1 + 0,095 \cdot 10^8 \beta^2 a^4 n^2; \quad \beta = \frac{bmk_p}{l};$$

круглый провод

$$k_{д,м} = 1 + 0,044 \cdot 10^8 \beta_1^2 d^4 n^2; \quad \beta_1 = \frac{dmk_p}{l}.$$

Добавочные потери в алюминиевых обмотках:

прямоугольный провод

$$k_{д,а} = 1 + 0,037 \cdot 10^8 \beta^2 a^4 n^2;$$

круглый провод

$$k_{д,а} = 1 + 0,017 \cdot 10^8 \beta^2 d^4 n^2.$$

Формулы для определения k_d справедливы при $f = 50$ Гц; для меди $\rho_m = 0,02135$ мкОм·м; для алюминия $\rho_a = 0,0344$ мкОм·м; a, b, l, d — в м; n, m — по рис. 22.31 (обычно $k_d = 1,01 \div 1,05$ до 1,10).

Потери в отводах, Вт:

медный провод

$$P_{отв,м} = 2,4 \cdot 10^{-12} J_{отв}^2 G_{отв},$$

алюминиевый провод

$$P_{отв,а} = 12,75 \cdot 10^{-12} J_{отв}^2 G_{отв}.$$

Потери в баке и металлических конструкциях, Вт:

$$P_б \approx 10k S_H,$$

где k — по табл. 22.19; S_H — в кВ·А;

$$P_K = P_{осн1} k_{д1} + P_{осн2} k_{д2} + P_{отв1} + P_{отв2} + P_б.$$

В двухобмоточных трансформаторах потери короткого замыкания P_K рассчитываются для обеих обмоток (для обмотки ВН на средней ступени) при нагрузке номинальными то-

ками. В трехобмоточных трансформаторах P_K определяют для заданного потребителем распределения нагрузок между обмотками, а при отсутствии заданного распределения токов рассчитывают потери для трех случаев нагрузки, дающих наибольшие потери, а именно при нагрузках номинальными токами обмоток ВН—СН, ВН—НН и СН—НН. Для обмоток, имеющих регулировочные ответвления, $P_{осн}$ рассчитывается для средней ступени.

Плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности обмоток $P_о$, м², для каждой обмотки, Вт/м²,

$$q = \frac{P_{осн} k_d}{P_о}.$$

Охлаждаемая поверхность каждой обмотки $P_о$ определяется как внешняя, обтекаемая маслом или воздухом суммарная открытая поверхность всех частей этой обмотки — витков, катушек, слоев с учетом закрытия частей этой поверхности изоляционными деталями — прокладками, рейками, шайбами:

$$P_о = P_{откр} k_a,$$

где $k_a = 0,75$.

Полученные значения q не должны быть выше данных табл. 22.146 для сухих трансформаторов. В масляных трансформаторах с естественной циркуляцией масла q не более 1200—1400 Вт/м², в редких случаях до 1600 Вт/м², с принудительной циркуляцией — до 2000—2200 Вт/м².

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %,

$$u_p = \frac{7,9 f S_{ст} \beta a_p k_p k_q}{u_b^2} 10^{-1},$$

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3},$$

$$k_p = 1 - \sigma, \quad \sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi l},$$

где a_{12} — радиальный размер канала между обмотками ВН и НН; a_1 и a_2 — радиальные размеры обмоток; l — осевой размер обмоток, выраженные в метрах (см. рис. 22.19);

$$k_q \approx 1 + \frac{l x^2}{m a_p k_p},$$

$$x = \frac{l_x}{l} \quad (l_x \text{ и } m \text{ — по рис. 22.32});$$

$$k_q = 1,0 \text{ при } l_x = 0.$$

Активная составляющая, %,

$$u_a = \frac{P_K}{10 S_H}, \quad P_K \text{ — в Вт; } S_H \text{ — в кВ·А;}$$

$$u_K = \sqrt{u_p^2 + u_a^2}.$$

Т а б л и ц а 22.19. Значения коэффициента k при расчете потерь в баке

Мощность S , кВ·А	До 1000	1000—4000	6300—10 000	16 000—25 000	40 000—63 000
k	0,015—0,02	0,025—0,04	0,04—0,045	0,045—0,053	0,06—0,07

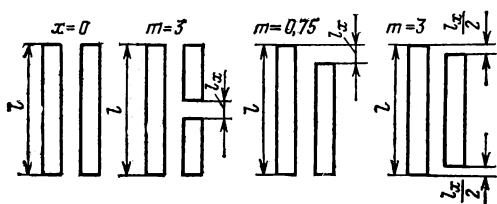


Рис. 22.32. Различные случаи взаимного расположения обмоток

Напряжение короткого замыкания u_k регламентируется для масляных и сухих силовых трансформаторов соответствующими государственными стандартами (см. § 22.29 и 22.31).

Допустимое отклонение у готового трансформатора $\pm 10\%$, в расчете рекомендуется отклонение не более $\pm 5\%$.

22.25. ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СИЛЫ В ОБМОТКАХ

Режимом короткого замыкания трансформатора называется такой режим, когда хотя бы одна из его обмоток питается от источника с переменным напряжением при коротком замыкании на зажимах одной из других обмоток. Если нет специальной оговорки, то предполагается, что напряжение источника питания равно номинальному напряжению первичной обмотки и синусоидально, а его частота равна номинальной частоте трансформатора. Режим короткого замыкания является аварийным режимом и при отсутствии надлежащей защиты может привести к тепловому разрушению изоляции и обмоток или к механическому разрушению обмоток трансформатора.

Каждый силовой трансформатор должен быть спроектирован так, чтобы при внешнем коротком замыкании мог выдерживать без повреждений динамические воздействия ударного тока короткого замыкания и термические воздействия ограниченного по времени установившегося тока короткого замыкания. Методы определения этих токов устанавливаются соответствующим нормативным документом и, токи, рассчитанные для каждого трансформатора, служат основой для проведения испытания этого трансформатора на стойкость при коротком замыкании.

В соответствии с указаниями ГОСТ 11677-85 токи короткого замыкания для силовых трансформаторов должны определяться следующим образом.

Установившийся ток короткого замыкания I_k для двухобмоточного трансформатора мощностью менее 1000 кВ·А

$$I_k = 100 \frac{I_N}{u_k}, \text{ но не более } 25I_N,$$

где I_N — номинальный ток фазы обмотки.

Для двухобмоточных трансформаторов мощностью от 1000 кВ·А и более при определении установившегося тока короткого замы-

Таблица 22.20. Мощности короткого замыкания сети $S_{K, c}$, МВ·А

Класс напряжения, обмотки, кВ	Мощность короткого замыкания сети, МВ·А	
	для трансформаторов классов напряжения ниже 110 кВ	для трансформаторов классов напряжения 110 кВ и выше
До 10 вкл.	500	2000
Свыше 10 до 35	2500	5000
110	—	15 000
150	—	20 000
220	—	25 000
330	—	35 000
500	—	50 000
750	—	75 000

Примечание. Для трансформаторов собственных нужд электростанций принимать $S_{K, c}$ по правой графе, кроме трансформаторов 32–63 МВ·А, для которых вести расчет I без учета $S_{K, c}$.

кания учитывается мощность короткого замыкания питающей трансформатор сети

$$I_k = 100 \frac{I_N}{u_k + u_{k,c}},$$

где $u_{k,c} = 100S_N/S_{K,c}$; S_N — номинальная мощность трансформатора; $S_{K,c}$ — по табл. 22.20.

Установившиеся токи короткого замыкания трехобмоточного трансформатора рассчитываются по трехлучевой схеме по рис. 22.33 без учета фазовых сдвигов.

Токи короткого замыкания в трех обмотках:

$$I_{k1} = \frac{100(Z_2 + Z_3)}{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3} I_N;$$

$$I_{k2} = \frac{100Z_3}{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3} I_N;$$

$$I_{k3} = \frac{100Z_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3} I_N,$$

где

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{T1} = 0,5(Z_{K12} + Z_{K13} - Z_{K23}); \\ Z_2 &= Z_{T2} + Z_{C2}; \quad Z_{T2} = 0,5(Z_{K12} + Z_{K23} - Z_{K13}); \\ Z_3 &= Z_{T3} + Z_{C3}; \quad Z_{T3} = 0,5(Z_{K13} + Z_{K23} - Z_{K12}); \\ Z_{C2} &= 100S_{N2}/S_{KC2}, \%; \quad Z_{C3} = 100S_{N3}/S_{KC3}, \%; \\ Z_{K12} &= u_{K12}, \%; \quad Z_{K13} = u_{K13}, \%; \quad Z_{K23} = u_{K23}, \%, \end{aligned}$$

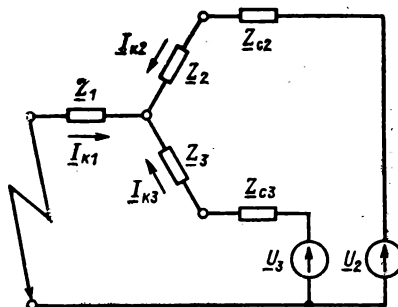


Рис. 22.33. Схема для расчета тока короткого замыкания трехобмоточного трансформатора

Таблица 22.21. Коэффициент для определения наибольшего ударного тока короткого замыкания

u_p/u_a	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14 и более
$k_{уд}\sqrt{2}$	1,51	1,63	1,75	1,95	2,09	2,19	2,28	2,38	2,46	2,55

Наибольший ударный ток короткого замыкания определяется по формуле

$$I_{к,уд} = k_{уд}\sqrt{2} I_k,$$

где $k_{уд}\sqrt{2}$ определяется по табл. 22.21.

При расчете тока короткого замыкания для заданного ответвления обмотки следует вместо u_k обмотки подставить $u_{к,отв}$ заданного ответвления и полученный ток I_k умножить на отношение номинального напряжения обмотки к номинальному напряжению ответвления $U_n/U_{отв}$.

Для известного трансформатора, работающего в известной сети, реальный ток короткого замыкания должен рассчитываться по методам, применяемым в расчетах электрических сетей, с учетом схемы сети, ее мощности, наличия в сети другого электрооборудования, места и условий короткого замыкания и т. д.

Радиальная механическая сила на одну обмотку, Н,

$$F_p = 0,628 (I_{к,уд} \omega)^2 \beta k_p \cdot 10^{-6}.$$

Для повышения механической стойкости внутренней обмотки (НН) под воздействием радиальных сил ее рекомендуется наматывать на жестком бумажно-бакелитовом цилиндре при достаточном числе реек между обмоткой и цилиндром или увеличивать сечение провода, снижая плотность тока. При отсутствии этих мер среднее сжимающее напряжение в проводах этой обмотки $\sigma_{сж} = \frac{F_p}{\pi \omega P_b}$ не должно пре-

вышать 30 МПа в медных и 15 МПа в алюминиевых обмотках.

При равномерном распределении по высоте обтекаемых током витков обеих обмоток возникают осевые силы $F'_{о,с} = F_p \frac{a_p}{2l}$. При наличии разрыва или укорочения в одной из обмоток помимо $F'_{о,с}$ возникают дополнительные осевые силы, которые могут быть найдены из анализа магнитного поля рассеяния [22.1].

22.26. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Для нормализованного ряда диаметров стержней магнитных систем силовых трансформаторов (см. § 22.17) нормализованы также: число ступеней в сечении стержня и ярма, размеры пакетов пластин; число, размеры и расположение охлаждающих каналов, а следовательно, и площади поперечных сечений стержня и ярма (табл. 22.22).

Активное сечение стержня, m^2 , $P_c = k_3 P_{ф,с}$.

Активное сечение ярма, m^2 , $P_y = k_3 P_{ф,я}$, где $P_{ф,с}$ и $P_{ф,я}$ — по табл. 22.22; k_3 — по табл. 22.5.

Индукция в стержне, Тл,

$$B_c = \frac{u_b}{4,44 f P_c}.$$

Индукция в ярме, Тл,

$$B_y = \frac{u_b}{4,44 f P_y}.$$

Таблица 22.22. Площади ступенчатой фигуры сечения стержня $P_{ф,с}$ и ярма $P_{ф,я}$ плоской шихтованной магнитной системы

d, m	Стержень		Ярмо, $P_{ф,я}, m^2$	d, m	Стержень		Ярмо, $P_{ф,я}, m^2$
	число ступеней	$P_{ф,с}, m^2$			число ступеней	$P_{ф,с}, m^2$	
0,080	4	0,0043	0,0045	0,280	8	0,0591	0,0591
0,085	5	0,0051	0,0052	0,290	8	0,0612	0,0623
0,090	5	0,0057	0,0058	0,300	8	0,0657	0,0675
0,095	5	0,0063	0,0064	0,310	9	0,0702	0,0716
0,100	6	0,0072	0,0073	0,320	9	0,0746	0,0762
0,105	6	0,0080	0,0080	0,330	9	0,0797	0,0820
0,110	6	0,0086	0,0090	0,340	9	0,0845	0,0861
0,115	6	0,0094	0,0095	0,350	9	0,0904	0,0928
0,120	6	0,0105	0,0107	0,360	9	0,0929	0,0948
0,125	6	0,0112	0,0115	0,370	10	0,0989	0,1004
0,130	6	0,0122	0,0125	0,380	10	0,1036	0,1063
0,140	6	0,0142	0,0144	0,390	10	0,1105	0,1124
0,150	6	0,0163	0,0166	0,400	11	0,1156	0,1168
0,160	6	0,0184	0,0188	0,420	11	0,1283	0,1315
0,170	6	0,0210	0,0216	0,450	14	0,1479	0,1500
0,180	6	0,0233	0,0238	0,480	14	0,1689	0,1719
0,190	7	0,0263	0,0267	0,500	14	0,1816	0,1844
0,200	7	0,0288	0,0296	0,530	15	0,2045	0,2078
0,210	7	0,0319	0,0327	0,560	15	0,2288	0,2317
0,220	8	0,0353	0,0361	0,600	16	0,2539	0,2591
0,230	8	0,0388	0,0394	0,630	16	0,2893	0,2958
0,240	8	0,0419	0,0426	0,670	16	0,3274	0,3398
0,250	8	0,0456	0,0463	0,710	16	0,3688	0,3798
0,260	8	0,0491	0,0507	0,750	16	0,4116	0,4252
0,270	8	0,0533	0,0543				

Примечание. Число ступеней в сечении ярма меньше числа ступеней в стержне на одну ($d=0,080 \div 0,180$ м); две ($d=0,190 \div 0,390$ м); при ($d=0,400 \div 0,600$ м) и далее на четыре-пять.

Масса стали в стержнях G_c и в ярмах $G_{я}$ при многоступенчатой нормализованной форме поперечного сечения стержня и ярма, кг,

$$G_c = 1,03cl_c \rho_c \gamma_{ст}.$$

Для холоднокатаной стали $\gamma_{ст} = 7650 \text{ кг/м}^3$. Число стержней магнитной системы $c=3$ для трехфазной и $c=2$ для однофазной магнитной системы.

При расчете потерь и тока холостого хода возникает необходимость выделить из общей массы стали ярем массу стали углов. Углом магнитной системы называют ее часть, ограниченную объемом, образованным пересечением боковых поверхностей или их продолжений одного из ярем и одного из стержней (заштрихованная часть на рис. 22.35, а). Масса стали угла — G_y .

Масса стали ярем

$$G_{я} = G'_{я} + G''_{я},$$

где $G'_{я}$ — масса стали двух ярем в их частях, заключенных между осями крайних стержней по рис. 22.34; $G''_{я}$ — масса стали двух ярем в их частях, заштрихованных на этом рисунке:

$$G'_{я} = 2(c-1)C \rho_{я} \gamma_{ст},$$

$$G''_{я} = 4 \frac{G_y}{2} = 2G_y.$$

Масса стали угла магнитной системы

$$G_y = 0,822 \Pi_{я} d \gamma_{ст}.$$

Полная масса стали $G_{ст} = G_c + G'_{я} + G''_{я}$.

Масса стали магнитной системы сухого трансформатора рассчитывается как для масляного, активное сечение стержня $\Pi_c =$

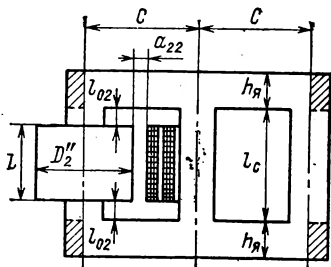


Рис. 22.34. Основные размеры магнитной системы

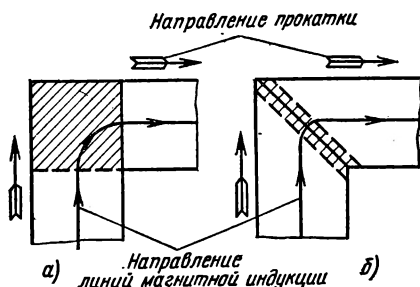


Рис. 22.35. Принципиальные схемы прямого и косоугольных стыков в углах магнитной системы. Заштрихованы зоны повышенных потерь

$$= \frac{\pi d^2}{4} k_{кр} k_{э}, \text{ где } k_{кр} \text{ — по табл. 22.2 или 22.3; } k_{э} \text{ — по табл. 22.5. Активное сечение ярма } \Pi_{я} = (1,01 \div 1,03) \Pi_c.$$

Потери холостого хода зависят от магнитных свойств стали, конструкции магнитной системы и принятой технологии ее изготовления. В углах магнитной системы (рис. 22.35) возникают добавочные потери, обусловленные анизотропией магнитных свойств холоднокатаной стали. Эти потери больше при прямых стыках (срез пластин под углом 90° по рис. 22.35, а) и существенно меньше при косых стыках (срез пластин под углом 45° по рис. 22.35, б). Механические воздействия на пластины стали в процессе их изготовления приводят к ухудшению магнитных свойств стали, которые могут быть частично восстановлены путем отжига пластин.

Потери холостого хода в магнитной системе, Вт, собранной из пластин холоднокатаной анизотропной стали со стержнями и ярами с многоступенчатой формой сечения, без проштамповки отверстий в пластинах, с прессовкой и стяжкой ярем яревыми балками и стержней бандажами (или путем расклинивания с обмоткой), могут быть рассчитаны по формулам:

в трехфазной магнитной системе

$$P_{хз} = k_{п,д} [\rho_c G_c + \rho_{я} (G'_{я} - 4G_y) + 3k_{п,у} (\rho_c + \rho_{я}) G_y];$$

в однофазной магнитной системе

$$P_{х1} = k_{п,д} [\rho_c G_c + \rho_{я} (G'_{я} - 2G_y) + 2k_{п,у} (\rho_c + \rho_{я}) G_y],$$

где $k_{п,у}$ — по табл. 22.24; ρ_c и $\rho_{я}$, Вт/кг, — удельные потери в стали при расчетной индукции и частоте по табл. 22.23; $k_{п,д} = 1,15$ при мощности трансформатора до 6300 кВ·А и 1,20 при больших мощностях для отжигаемых пластин и соответственно 1,25 и 1,30 для неотжигаемых пластин.

Ток холостого хода для магнитной системы из холоднокатаной стали, так же как и потери, зависит от магнитных свойств стали, конструктивных и технологических факторов, причем воздействие этих факторов на ток сказывается значительно больше, чем на потери.

Намагничивающая мощность при холостом ходе для магнитной системы, собранной из отожженных пластин холоднокатаной анизотропной стали, со стержнями и ярами с многоступенчатой формой сечения, без проштамповки отверстий в пластинах, с прессовкой и стяжкой ярем яревыми балками и стержней бандажами может быть определена по формулам:

в трехфазной плоской магнитной системе

$$Q_{хз} = k_{т,д} [q_c G_c + q_{я} (G'_{я} - 4G_y) + 3k_{т,у} k_{т,пл} (q_c + q_{я}) G_y] + k_{т,д} Q_3;$$

Таблица 22.23. Удельные потери для холоднокатаных сталей марок 3404 и 3405 при различных индукциях и частоте 50 Гц

В, Тл	Марка стали			
	3404; 0,35 мм	3404; 030, мм 3405; 035, мм	3405; 0,30 мм	3404 и 3405; $p_1, В \cdot А/м^2$
	Вт/кг	Вт/кг	Вт/кг	
1,00	0,475	0,450	0,425	345
1,10	0,575	0,545	0,520	430
1,20	0,675	0,635	0,610	515
1,30	0,785	0,755	0,715	620
1,40	0,930	0,875	0,835	730
1,50	1,100	1,030	0,970	850
1,52	1,134	1,070	1,004	878
1,54	1,168	1,110	1,038	906
1,56	1,207	1,150	1,074	934
1,58	1,251	1,190	1,112	962
1,60	1,295	1,230	1,150	990
1,62	1,353	1,278	1,194	1017
1,64	1,411	1,326	1,238	1044
1,66	1,472	1,380	1,288	1071
1,68	1,536	1,440	1,344	1098
1,70	1,600	1,500	1,400	1125
1,75	1,784	1,656	1,554	1200
1,80	2,000	1,860	1,740	1275

Таблица 22.24. Коэффициент $k_{п,у}$ для расчета потерь холостого хода (для $B_c = 1,4 \div 1,7$ Тл)

Число углов со стыками		Коэффициент $k_{п,у}$ для разных марок стали		
косы-ми	пря-мыми	3404; 0,35 мм	3404; 0,30 мм 3405; 0,35 мм	3405; 0,30 мм
Трехфазная магнитная система				
6	—	1,43	1,46	1,48
2	4	1,70	1,74	1,78
—	6	1,95	2,19	2,26
Однофазная магнитная система				
4	—	1,32	1,35	1,36
—	4	1,95	2,02	2,08

в однофазной плоской магнитной системе

$$Q_{x1} = k'_{т,д} [q_c G_c + q_y (G'_y - 2G_y) + 2k_{т,у} k_{т,пл} (q_c + q_y) G_y] + k''_{т,д} Q_3,$$

где коэффициенты для стали марок 3404 и 3405:

$k'_{т,д} = 1,30$ и $1,40$ соответственно для трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А и больших для отожженных пластин и $1,70$ и $1,85$ для неотожженных пластин;

$k_{т,у}$ — по табл. 22.26;

$k_{т,пл} = 1,35$ и $1,20$ соответственно при мощностях до 1600 кВ·А и больших;

$k''_{т,д} = 1,07$ и $1,15$ соответственно при мощностях до 6300 кВ·А и больших.

Удельная намагничивающая мощность q_c и q_y по табл. 22.25.

Намагничивающая мощность для немагнитных шихтованных зазоров $Q_3 = \sum n_3 q_3 P_3$,

где n_3 — число зазоров каждого размера; q_3 — удельная намагничивающая мощность на $1 м^2$ зазора; $P_3, м^2$ — площадь каждого зазора.

Для косого стыка $P_3 = \sqrt{2} P_c$, для прямого $P_3 = P_c$. Индукция B_3 на косом стыке $B_{31} = B_c / \sqrt{2}$ на прямом $B_{32} = B_c$. Значения удельной намагничивающей мощности для зазоров q_{31} и q_{32} находятся для индукций B_{31} и B_{32} по табл. 22.25.

Трехфазная магнитная система: шесть косых стыков $Q_3 = 8,45 q_{31} P_c$; четыре косых и

Таблица 22.25. Удельная намагничивающая мощность для холоднокатаных сталей марок 3404 и 3405 при различных индукциях и частоте 50 Гц

В, Тл	Марка стали					
	3404; 0,35 мм	3404; 0,30 мм	3405; 0,35 мм	3405; 0,30 мм	3404	3405
	$q_c, В \cdot А/кг$				$q_3, В \cdot А/м^2$	
1,00	0,548	0,540	0,533	0,525	1000	900
1,10	0,650	0,640	0,630	0,620	2500	2300
1,20	0,752	0,742	0,732	0,722	4000	3700
1,30	0,900	0,870	0,860	0,850	7400	6000
1,40	1,060	1,040	1,020	1,000	11 400	9200
1,50	1,330	1,289	1,246	1,205	16 600	13 800
1,52	1,408	1,360	1,311	1,263	17 960	14 760
1,54	1,486	1,431	1,376	1,321	19 320	15 720
1,56	1,575	1,511	1,447	1,383	20 700	16 800
1,58	1,675	1,600	1,524	1,449	22 100	18 000

Продолжение табл. 22.25

В, Тл	Марка стали					
	3404; 0,35 мм	3404; 0,30 мм	3405; 0,35 мм	3405; 0,30 мм	3404	3405
	$q_c, В \cdot А/кг$				$q_3, В \cdot А/м^2$	
1,60	1,775	1,688	1,602	1,525	23 500	19 200
1,62	1,956	1,850	1,748	1,645	25 100	20 480
1,64	2,131	2,012	1,894	1,775	26 700	21 760
1,66	2,556	2,289	2,123	1,956	28 600	23 160
1,68	3,028	2,681	2,435	2,188	30 800	24 680
1,70	3,400	3,073	2,747	2,420	33 000	27 000
1,75	6,370	5,660	4,950	4,238	39 300	31 920
1,80	11,500	10,130	8,770	7,400	48 000	37 000

Таблица 22.26. Значения коэффициента $k_{т,у}$ для различного числа углов с косыми и прямыми стыками плоской шихтованной магнитной системы для стали марок 3404 и 3405, 0,35 и 0,30 мм при $f = 50$ Гц

Число углов со стыками		Индукция В, Тл			
косыми	прямыми	1,4	1,5	1,6	1,7
Трехфазная магнитная система					
6	—	4,35	4,65	4,65	4,35
4	2	6,38	6,95	7,08	6,75
—	6	9,75	10,80	10,95	10,80
Однофазная магнитная система (два стержня)					
4	—	4,0	4,3	4,3	4,0
—	4	9,0	9,8	10,1	9,8

три прямых стыка $Q_3 = (5,65 q_{31} + 3q_{32})P_c$; семь прямых стыков $Q_3 = 7,0 q_{32}P_c$.

Однофазная магнитная система: четыре косых стыка $Q_3 = 6,65 q_{31}P_c$; четыре прямых стыка $Q_3 = 4,0 q_{32}P_c$.

Ток холостого хода трансформатора: активная составляющая, A ,

$$I_{x,a} = \frac{P_x}{mU_\phi} \quad \text{или} \quad i_{0a} = \frac{P_x}{10S_H} \%,$$

где P_x — в Вт; S_H — в кВ·А;
реактивная составляющая

$$I_{x,p} = \frac{Q_x}{mU_\phi} \quad \text{или} \quad i_{0p} = \frac{Q_x}{10S_H} \%$$

Полный ток холостого хода, A ,

$$I_x = \sqrt{I_{x,a}^2 + I_{x,p}^2}$$

или, %,

$$i_0 = \sqrt{i_{0a}^2 + i_{0p}^2}.$$

22.27. ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Приближенные величины массы активной стали и металла обмоток масляных трансформаторов, соответствующих требованиям современных стандартов, приведены в табл. 22.27 и 22.28.

Диаметр стержня трансформатора d , мм, можно приближенно определить по формуле

$$d = k \cdot 10^{-2} \sqrt[4]{S_{ст}},$$

где коэффициент k может быть принят равным 5,0—5,2 для масляных трансформаторов мощностью от 25 до 630 кВ·А, 5,2—5,3 при мощностях 1000—16 000 кВ·А (алюминиевые обмотки) и 5,2—5,3 при больших мощностях (медные обмотки). Диаметр стержня у реаль-

Таблица 22.27. Приближенные массы металла обмоток трехфазных трансформаторов различных классов напряжения, кг

Мощность, кВ·А	Сухие			Масляные		
	двухобмоточные ПБВ			Масляные		
10 кВ	10 кВ	10 кВ	35 кВ	110 кВ	110 кВ	110 кВ
25	—	27	—	6300	1900	3480
40	—	36	—	10 000	3000	4350
63	—	46	—	16 000	3650	6740
100	—	68	—	25 000	7780	8970
160	100	84	108	32 000	8540	9100
250	150	124	132	40 000	10 280	10 300
400	240	148	178	63 000	15 200	15 180
630	360	226	293	80 000	17 300	18 500
1000	450	290	315	Обмотки из алюминия — в двухобмоточных трансформаторах 25—16 000 кВ·А. Обмотки из меди — в двухобмоточных трансформаторах 25 000—80 000 кВ·А и трехобмоточных 6300—80 000 кВ·А		
1600	680	460	440			
2500	—	500	540			
4000	—	810	790			
6300	—	1100	1090			

Таблица 22.28. Приближенные массы активной стали трехфазных трансформаторов различных классов напряжения, кг

Мощность, кВ·А	Сухие			Масляные		
	двухобмоточные ПБВ			Масляные		
10 кВ	10 кВ	10 кВ	35 кВ	110 кВ	110 кВ	110 кВ
25	—	81	—	6300	6400	7000
40	—	119	—	10 000	9000	11 000
63	—	165	—	16 000	12 500	13 000
100	—	214	—	25 000	16 800	17 500
160	580	315	380	32 000	20 000	22 000
250	820	415	525	40 000	23 500	26 000
400	1160	650	720	63 000	33 000	34 000
630	1740	900	1085	80 000	40 000	41 000
1000	2500	1350	1240			
1600	3570	1950	1600			
2500	—	2650	2400			
4000	—	3700	3250			
6300	—	5300	4500			

ного трансформатора должен совпадать с одним из значений нормализованного ряда диаметров (см. § 22.17). Для трехобмоточного трансформатора подкоренная величина принимается равной 1,5 $S_{ст}$.

Для трансформаторов одинаковой мощности с одинаковыми параметрами холостого хода и короткого замыкания с алюминиевыми и медными обмотками можно принять следующие приближенные отношения размеров и других данных трансформатора с алюминиевыми обмотками по отношению к данным трансформатора с медными обмотками.

Диаметр стержня $d_a \approx (0,9 \div 0,95) d_m$.

Длина стержня $l_{c,a} \approx (1,4 \div 1,5) l_{c,m}$.

Расстояние между осями стержней $C_a \approx (1,0 \div 1,05) C_m$.

Высота магнитной системы (стержень и два ярма) $H_{c,a} \approx (1,5 \div 1,3) H_{c,m}$.

Число витков в обмотке $w_a \approx (1,25 \div 1,1) w_m$.

Масса металла обмоток $G_{o,a} \approx (0,63 \div 0,65) G_{o,m}$.

Масса стали магнитной системы $G_{ст,a} \approx G_{ст,m}$.

Плотность тока в обмотках $J_a \approx (0,55 \div 0,6) J_m$.

Сжимающие напряжения в обмотках при коротком замыкании $\sigma_{сж,a} \approx (0,36 \div 0,4) \sigma_{сж,m}$.

Плотность теплового потока на поверхности обмоток $q_a \approx (0,6 \div 0,7) q_m$.

22.28. НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРА

Нагрузочной способностью называется совокупность допустимых нагрузок и перегрузок трансформатора. Исходным режимом для определения нагрузочной способности является номинальный режим работы трансформатора на основном ответвлении при номинальных условиях места установки и охлаждающей среды, определяемых соответствующим стандартом или техническими условиями.

Допустимым режимом нагрузки называется режим продолжительной нагрузки трансформатора, при котором расчетный износ

изоляции обмоток от нагрева не превышает износа, соответствующего номинальному режиму работы. Перегрузкой трансформатора считается такой режим, при котором расчетный износ изоляции обмоток, соответствующий установившимся превышениям температуры, превосходит износ, соответствующий номинальному режиму работы. Возможен также и ограниченный по времени режим работы трансформатора, отличный от номинального режима, при котором износ изоляции обмоток не превышает допустимого износа.

Основаниями для ограниченных по времени систематических нагрузок (в том числе и нагрузок сверх номинальной мощности) масляного силового трансформатора являются неполная нагрузка трансформатора и пониженные температуры его обмоток и масла в период, предшествующий допустимой нагрузке, а также пониженная температура охлаждающей среды воздуха или воды.

Эти режимы работы установлены стандартом ГОСТ 14209-84, который дает возможность лучшего использования систем охлаждения, рациональной загрузки силовых трансформаторов и оптимального выбора номинальных мощностей силовых трансформаторов при проектировании подстанций. Этот стандарт устанавливает допустимые нагрузки и перегрузки силовых трансформаторов общего назначения с видами охлаждения М, Д, ДЦ и Ц (см. табл. 22.35) мощностью до 100 000 кВ·А включительно.

Стандарт дает возможность произвести расчет допустимых нагрузок и перегрузок и износа изоляции витков обмоток. Он также устанавливает нормы максимальных допустимых систематических нагрузок и аварийных перегрузок трансформаторов по значению и длительности.

Стандартом предусмотрены ограниченные по времени допустимые систематические нагрузки силового трансформатора (в том числе и сверх номинальной мощности), не вызывающие сокращения срока службы трансформатора, так как за продолжительность графика нагрузки они обеспечивают нормальный или пониженный против нормального расчетный износ изоляции витков.

Предусмотренные стандартом допустимые аварийные перегрузки трансформатора вызывают повышенный по сравнению с нормативным расчетный износ изоляции, что может привести к сокращению нормированного срока службы трансформатора, если повышенный износ впоследствии не компенсируется нагрузками с износом ниже нормального. Нагрузка трансформатора сверх его номинальной мощности допускается только при вполне исправной и полностью включенной системе охлаждения трансформатора.

Для определения значений и продолжительности допустимых нагрузок и аварийных перегрузок трансформатора, а также для определения расчетного износа изоляции витков при аварийных перегрузках необходимо реальный график нагрузки преобразовать в двухступенчатый прямоугольный график. При этом начальную нагрузку двухступенчатого графика K_1 следует определять по формуле

$$K_1 = \frac{1}{S_H} \sqrt{\frac{s_1^2 t_1 + s_2^2 t_2 + \dots + s_m^2 t_m}{t_1 + t_2 + \dots + t_m}},$$

где $s_1, s_2, \dots, s_m$ — значения нагрузок на m интервалах, вообще говоря, не равных, и $t_1, t_2, \dots, t_m$ — продолжительность каждого интервала.

Участок повышенной нагрузки разбивается на p интервалов (не обязательно равных по продолжительности) со значениями нагрузки $s_1, s_2, \dots, s_p$ и интервалами $h_1, h_2, \dots, h_p$. Далее определяется коэффициент

$$K_2 = \frac{1}{S_H} \sqrt{\frac{(s_1')^2 h_1 + (s_2')^2 h_2 + \dots + (s_p')^2 h_p}{h_1 + h_2 + \dots + h_p}}.$$

По рассчитанным значениям K_1 и K_2 с учетом температуры охлаждающей среды по таблицам стандарта определяется допустимая нагрузка заданной длительности или допустимая длительность заданной нагрузки. Для аварийных перегрузок по таблицам стандарта определяются допустимая длительность перегрузки при ее заданном значении и относительный износ изоляции витков.

Температуру охлаждающей среды следует принимать равной ее среднему значению за продолжительность графика нагрузки, если она положительна и ее изменение не превышает 12°C . Если она отрицательна или ее изменение превышает 12°C , ее эквивалентное значение следует определять по приложению к стандарту.

ГОСТ 14209-84 «Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки» дает возможность рационального регулирования эксплуатационной нагрузки силовых трансформаторов, лучшего использования их систем охлаждения и нагрузочной способности.

22.29. ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ СЕТЕЙ 10, 35, 110, 220, 330 и 500 кВ

Таблицы параграфа содержат данные трансформаторов и автотрансформаторов, выпускаемых в настоящее время заводами (табл. 22.29—22.34). При пользовании этими таблицами необходимо учесть следующие замечания.

Буквы и цифры в обозначениях типа означают (в порядке написания):

А — автотрансформатор (трансформатор не имеет обозначения);

Т — трехфазный или О — однофазный;

Р — наличие расщепленной обмотки НН.

Вид охлаждения обозначается одной или двумя буквами по табл. 22.35:

Т — трехобмоточный;

Н — выполнение одной из обмоток с устройством РПН.

В числителе дроби после буквенного обозначения типа указывается номинальная мощность трансформатора в кВ·А, в знаменателе — класс напряжения обмотки ВН в кВ.

Масляные трансформаторы мощностью до 1,6 МВ·А включительно выпускаются в баках

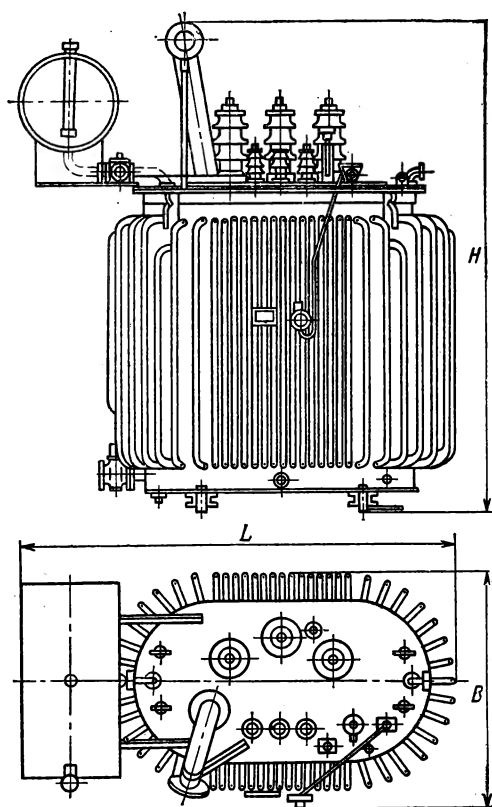


Рис. 22.36. Габаритные размеры трансформаторов до 1600 кВ·А; ВН — до 35 кВ

с охлаждаемыми трубами (рис. 22.36) или с прямотрубными радиаторами, приваренными к баку или навесными, при мощностях 2,5—6,3 МВ·А — с навесными радиаторами (рис. 22.37). В трансформаторах 10 МВ·А и выше применяют масляное охлаждение с дутьем (Д) — навесные радиаторы баков обдуваются установленными на них вентиляторами. При выключенных вентиляторах трансформатор может нести нагрузку до 50 % номинальной. Для дальнейшей интенсификации теплоотдачи применяется циркуляционное охлаждение — масло откачивается из бака насосами и охлаждается в охладителе — воздушном (ДЦ) или водяном (Ц).

При мощностях 10 МВ·А и выше большинство трансформаторов общего назначения имеют баки с нижним разъемом. Бак состоит из двух частей: нижней высотой 300—500 мм, на которой устанавливается активная часть, и верхней, которая может быть снята при осмотре или ремонте активной части без подъема активной части трансформатора.

Для регулирования напряжения обмоток большинство масляных трансформаторов имеют отключения на обмотках ВН и (или) СН для переключения без возбуждения (ПБВ) или регулирования под нагрузкой (РПН). У трансформаторов ПБВ управление переключателями выведено на крышку трансформатора или на ручной привод снаружи бака. Аппаратура РПН размещается в баке трансформато-

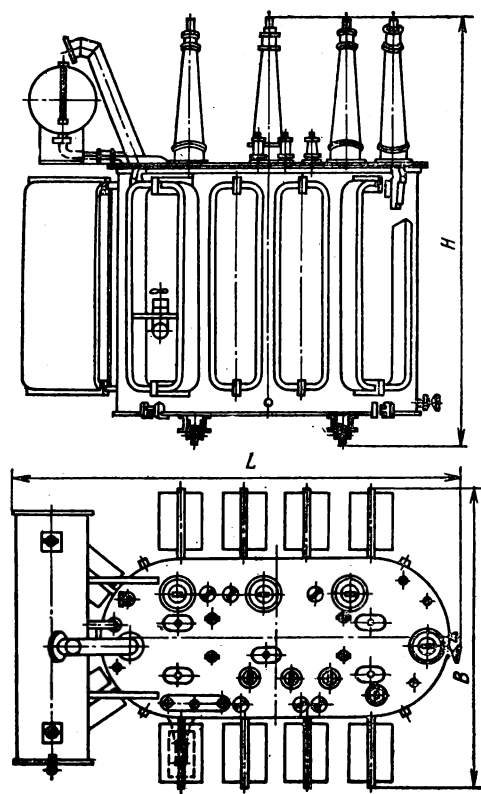


Рис. 22.37. Габаритные размеры трансформаторов от 2500 до 100 000 кВ·А; ВН — 110 и 220 кВ

ра, управление переключающими устройствами дистанционное и автоматизированное, но может осуществляться и без использования автоматики. При дистанционном управлении переход с одной ступени на другую, соседнюю, требует около 3 с.

Нейтраль обмоток трансформаторов с напряжениями 6, 10 и 35 кВ изолирована от земли, обмоток с напряжениями 110, 150, 220, 330 и 500 кВ заземлена наглухо.

Параметры холостого хода и короткого замыкания и некоторые другие данные масляных трансформаторов и автотрансформаторов приведены в табл. 22.29, 22.30 и 22.31, схемы и группы соединения обмоток трансформаторов — в табл. 22.32.

В табл. 22.29а — и параметры трансформаторов (напряжение короткого замыкания u_k , %, потери холостого хода P_x , потери короткого замыкания P_k и ток холостого хода i_0) даны по соответствующим ГОСТ, массовые и габаритные данные — частично по этим стандартам, частично по справочным данным. Для трехобмоточных трансформаторов потери короткого замыкания даны максимальные для одного из трех сочетаний обмоток ВН—НН, ВН—СН, СН—НН. Напряжение короткого замыкания дано на средней ступени регулирования при номинальной мощности трансформатора. Потери холостого хода соответствуют уровню Б соответствующих стандартов, т. е. трансформаторам с магнитной системой, собранной из электротехнической стали с удельны-

Таблица 22.29. Трансформаторы силовые масляные общего назначения трехфазные двух- и трехобмоточные с охлаждением естественным масляным (М), масляным с дутьем (Д) и с принудительной циркуляцией масла (ДЦ), классов напряжения 10, 35, 110 и 220 кВ, выпускаемые заводами

Тип трансформатора	μ_k , %	Потери, кВт		i_0 , %	Масса, т		Габариты, мм			Цена, тыс. руб.
		P_x	P_k		полная	масла	H	L	B	
а) Двухобмоточные классов напряжения 10 и 35 кВ, соответствующие требованиям ГОСТ 12022-76										
ТМ-25/10	4,5	0,135	0,600	3,2	0,380	—	1225	1120	460	0,290
ТМ-40/10	4,5	0,190	0,880	3,0	0,485	—	1270	1120	480	0,350
ТМ-63/10	4,5	0,265	1,280	2,8	0,620	—	1400	1120	560	0,410
ТМ-100/10	4,5	0,365	1,970	2,6	0,740	—	1470	1200	800	0,570
ТМ-160/10	4,5	0,565	2,65	2,4	1,150	—	1600	1220	1020	0,740
ТМ-250/10	4,5	0,820	3,70	2,3	1,475	—	1760	1310	1050	1,000
ТМ-400/10	4,5	1,050	5,50	2,1	1,90	—	1900	1400	1080	1,410
ТМ-630/10	5,5	1,560	7,60	2,0	3,00	—	2150	1750	1275	2,035
ТМ-100/35	6,5	0,465	1,970	2,6	1,300	—	2200	1330	900	1,000
ТМ-160/35	6,5	0,700	2,65	2,4	1,700	—	2260	1400	1000	1,400
ТМ-250/35	6,5	1,000	3,70	2,3	2,000	—	2320	1500	1250	1,800
ТМ-400/35	6,5	1,35	5,50	2,1	2,700	—	2500	1650	1350	2,340
ТМ-630/35	6,5	1,90	7,60	2,0	3,500	—	2750	2100	1450	3,050
б) Двухобмоточные классов напряжения 10 и 35 кВ, соответствующие требованиям ГОСТ 11920—73										
ТМ-1000/10	5,5	2,45	12,2	1,4	5,0	—	3000	2700	1750	2,965
ТМ-1600/10	5,5	3,3	18,0	1,3	7,0	—	3400	2450	2300	4,150
ТМ-2500/10	5,5	4,6	26,0	1,0	8,0	—	3600	3500	2260	5,800
ТМ-4000/10	6,5	6,4	33,5	0,9	13,2	—	3900	3900	3650	8,400
ТМ-6300/10	6,5	9,0	46,5	0,8	17,3	—	4050	4300	3700	11,400
ТМ-1000/35	6,5	2,75	12,2	1,5	6,0	1,95	3150	2700	1570	4,00
ТМ-1600/35	6,5	3,65	18,0	1,4	7,1	2,43	3400	2650	2300	5,20
ТМ-2500/35	6,5	5,1	25,0	1,1	9,6	2,58	3800	3800	2450	6,00
ТМ-4000/35	7,5	6,7	33,5	1,0	13,2	4,10	3900	3900	3650	8,70
ТМ-6300/35	7,5	9,4	46,5	0,9	16,2	4,80	4050	4300	3700	11,30
ТД-10000/35	7,5	14,5	65,0	0,8	21,8	—	4350	3000	3760	16,00
ТД-16000/35	8,0	21,0	90,0	0,6	31,3	—	4860	3950	3970	24,30
ТД-40000/35	8,5	36,0	165,0	0,4	52,3	—	5700	5300	4400	—
ТДЦ-80000/35	9,5	60,0	280,0	0,3	—	—	—	—	—	—
в) Трехобмоточные класса напряжения 35 кВ, соответствующие требованиям ГОСТ 11920-73										
ТМТН-6300/35	—	12,0	55,0	1,20	26,5	—	4500	5200	4300	29,00
ТДТН-10000/35	—	19,0	75,0	1,00	35,0	—	5200	6000	4300	37,00
ТДТН-16000/35	—	28,0	115,0	0,95	47,0	—	5500	6500	4500	47,00
г) Двухобмоточные повышающие класса напряжения 110 кВ, ПБВ и без ответвлений, соответствующие требованиям ГОСТ 12965-74										
ТД-40000/110	10,5	52,0	175,0	0,65	—	—	—	—	—	—
ТДЦ-80000/110	10,5	89,0	310,0	0,55	96,0	15,0	7000	7800	5400	113,7
ТДЦ-125000/110	10,5	120,0	400,0	0,55	127,8	18,7	7000	8000	4700	140,0
ТДЦ-200000/110	10,5	170,0	550,0	0,50	187,0	24,3	7100	7560	3550	222,0
ТДЦ-250000/110	10,5	200,0	640,0	0,50	203,0	22,5	—	—	—	255,0
ТДЦ-400000/110	10,5	320,0	900,0	0,45	313,0	33,0	7750	14 600	8300	373,0
д) Двухобмоточные класса напряжения 110 кВ, РПН, соответствующие требованиям ГОСТ 12965-74										
ТМН-2500/110	10,5	6,5	22,0	1,50	24,05	10,40	4090	5150	3540	26,0
ТМН-6300/110	10,5	11,5	48,0	0,80	37,75	14,50	5150	6080	3170	36,0
ТДН-10000/110	10,5	15,5	60,0	0,70	43,40	15,10	5380	5900	4270	40,0
ТДН-16000/110	10,5	24,0	85,0	0,70	43,30	13,25	6300	6910	4470	48,0
ТРДН-25000/110	10,5	30,0	120,0	0,70	67,20	20,00	5820	6580	4650	65,5
ТРДН-32000/110	10,5	40,0	145,0	0,70	75,72	24,51	—	—	—	76,5
ТРДН-40000/110	10,5	50,0	160,0	0,65	92,42	28,20	6190	6930	4850	88,0
ТРДЦН-63000/110	10,5	70,0	245,0	0,60	108,9	29,00	6500	8300	4400	110,0
ТРДЦН-80000/110	10,5	85,0	310,0	0,60	136,5	36,30	—	—	—	126,0
ТРДЦН-125000/110	10,5	120,0	400,0	0,55	—	—	—	—	—	—
е) Трехобмоточные класса напряжения 110 кВ, РПН, соответствующие требованиям ГОСТ 12965-74										
ТМТН-6300/110	—	17,0	58,0	1,2	44,2	16,7	5400	6200	3500	41,7
ТДТН-10000/110	—	23,0	76,0	1,1	57,1	21,6	5400	6900	3750	51,0
ТДТН-16000/110	—	32,0	96,0	1,0	59,8	19,5	6200	7200	4400	62,0
ТДТН-25000/110	—	45,0	140,0	0,9	76,6	23,5	6400	7400	4600	72,3
ТДТН-40000/110	—	63,0	200,0	0,8	103,6	27,9	6300	7500	4900	94,4
ТДТН-63000/110	—	87,0	290,0	0,7	135,0	37,0	7000	8200	4700	126,0
ТДТН-80000/110	—	102,0	390,0	0,6	148,2	38,2	7200	9600	4800	137,0
ж) Двухобмоточные повышающие класса напряжения 220 кВ, ПБВ и без ответвлений, соответствующие требованиям ГОСТ 15957-70										
ТДЦ-80000/220	11,0	105	320	0,6	156,0	44,8	—	—	—	151,5
ТДЦ-125000/220	11,0	135	380	0,5	170,0	34,5	7140	9500	5600	186,0
ТДЦ-200000/220	11,0	200	580	0,45	210,0	45,1	7360	12 600	6340	253,0
ТДЦ-250000/220	11,0	240	650	0,45	253,0	41,7	8800	11 700	5650	284,0
ТДЦ-400000/220	11,0	330	880	0,4	352,0	45,8	7970	12 550	4480	389,0
ТЦ-630000/220	11,0	380	1300	0,35	477,0	58,0	8100	12 200	5100	574,0

Продолжение табл. 22.29

Тип трансформатора	μ_K , %	Потери, кВт		i_0 , %	Масса, т		Габариты, мм			Цена, тыс. руб.
		P_x	P_K		полная	масла	H	L	B	
з) Двухобмоточные класса напряжения 220 кВ, РПН, соответствующие требованиям ГОСТ 15957-70										
ТРДН-32000/220	12,0	53	167	0,9	112,0	37,5	8350	8900	5500	119,0
ТРДЦН-63000/220	12,0	82	300	0,8	136,5	39,0	8600	8000	5550	156,6
ТРДЦН-100000/220	12,0	115	360	0,7	—	—	—	—	—	—
ТРДЦН-160000/220	12,0	167	525	0,6	236,0	55,1	7550	12 300	6000	269,0
и) Трехобмоточные класса напряжения 220 кВ, РПН, соответствующие требованиям ГОСТ 15957-70										
ТДТН-25000/220	—	50	135	1,2	114,3	38,5	8400	10 160	5120	114,6
ТДТН-40000/220	—	66	240	1,1	121,3	41,6	7510	11 100	5400	130,0
ТДЦТН-63000/220	—	91	320	1,0	—	—	—	—	—	—

Таблица 22.30. Трансформаторы двухобмоточные трехфазные и однофазные классов напряжения 330 и 500 кВ

Тип трансформатора	ВН, кВ	НН, кВ	μ_K , %	Потери, кВт		i_0 , %
				P_x	P_K	
а) Двухобмоточные повышающие класса напряжения 330 кВ без регулировочных ответвлений, соответствующие требованиям ГОСТ 17545-72						
ТДЦ-125000/330	347	10,5; 13,8	11,0	145	360	0,5
ТДЦ-200000/330	347	13,8; 15,75; 18,0	11,0	220	560	0,45
ТДЦ-250000/330	347	13,8; 15,75	11,0	240	605	0,45
ТДЦ-400000/330	347	15,75; 20,0	11,0	365	810	0,4
ТЦ-630000/330	347	15,75; 20,0	11,0	405	1380	0,3
ТЦ-1000000/330	347	24,0	11,5	480	2200	0,3
б) Двухобмоточные класса напряжения 330 кВ, РПН, соответствующие требованиям ГОСТ 17545-72						
ТРДН-32000/330	330	6,3—6,3; 6,3—10,5; 10,5—10,5	11,0	82	170	0,85
ТДН-32000/330	330	38,5 (нерасщепленная)	11,0	82	170	0,85
ТРДН-63000/330	330	6,3—6,3; 6,3—10,5; 10,5—10,5	11,0	120	265	0,7
ТДН-63000/330	330	38,5 (нерасщепленная)	11,0	120	265	0,7
ТРДН-125000/330	330	10,5—10,5	11,0	180	420	0,5
в) Двухобмоточные повышающие трехфазные класса напряжения 500 кВ без регулировочных ответвлений, соответствующие требованиям ГОСТ 17544-72						
ТДЦ-250000/500	525	13,8; 15,75; 20,0	13,0	250	600	0,45
ТДЦ-400000/500	525	13,8; 15,75; 20,0	13,0	385	800	0,40
ТЦ-630000/500	525	15,75; 20,0; 24,0	14,0	500	1300	0,35
г) Двухобмоточные повышающие однофазные класса напряжения 500 кВ без регулировочных ответвлений, соответствующие требованиям ГОСТ 17544-72						
ОРДЦ-333000/500	$525/\sqrt{3}$	15,75—15,75; 20—20; 24—24	12,0	200	950	0,35
ОРЦ-417000/500	$525/\sqrt{3}$	15,75—15,75; 20—20; 24—24	13,0	255	1180	0,30
ОРЦ-533000/500	$525/\sqrt{3}$	18—18; 24—24; 24—24/ $\sqrt{3}$	13,5	300	1400	0,30

Примечания: 1. Расщепленные обмотки НН трансформаторов по табл. 22.30, б и г имеют номинальные мощности частей по 50 % номинальной мощности трансформатора.

2. Трансформаторы по табл. 22.30, б имеют РПН в нейтрали обмотки ВН в диапазоне регулирования +12 % не менее 8 ступеней.

Таблица 22.31. Автотрансформаторы трехобмоточные трехфазные и однофазные классов напряжения 220, 330 и 500 кВ, РПН

Тип трансформатора	Мощность, мВ·А		Сочетание напряжений, кВ			Потери, кВт		Напряжение ко роткого замыкания, %			i ₀ , %
	номиналь- ная	обмотки НН	ВН	СН	НН	P _x	P _k (ВН—СН)	ВН—СН	ВН—НН	СН—НН	
а) Автотрансформаторы трехфазные класса напряжения 220 кВ, РПН, соответствующие требованиям ГОСТ 15957-70											
АТДТН-32000/220	32	16	230	121	6,6; 11; 38,5	32	145	11,0	34	21	0,6
АТДТН-63000/220	63	32	230	121	6,6; 11; 38,5	45	215	11,0	35	22	0,5
АТДТН-100000/220	100	50	230	121	6,6; 11; 38,5	75	260	11,0	31	19	0,5
АТДЦТН-125000/220	125	63	230	121	6,6; 11; 13,8; 38,5	85	290	11,0	31	19	0,5

Продолжение табл. 22.31

Тип трансформатора	Мощность, мВ·А		Сочетание напряжений, кВ			Потери, кВт		Напряжение короткого замыкания, %			ι_0 , %
	номиналь- ная	обмотки НН	ВН	СН	НН	P_x	P_k (ВН—СН)	ВН—СН	ВН—НН	СН—НН	
АТДЦТН-160000/220	160	80	230	121	6,6; 11; 13,8; 38,5	100	380	11,0	32	20	0,5
АТДЦТН-200000/220	200	100	230	121	38,5	125	430	11,0	32	20	0,5
АТДЦТН-250000/220	250	125	230	121	11,0; 13,8; 15,75	145	520	11,0	32	20	0,5

б) Автотрансформаторы трехфазные класса напряжения 330 кВ, РПН, соответствующие требованиям ГОСТ 17545-72

АТДЦТН-63000/330	63	32	330	115	6,6; 11,0; 15,75; 38,5	70	280	10,0	32	21,5	0,6
АТДЦТН-125000/330	125	63	330	115	6,6; 11,0; 15,75; 38,5	115	370	10,0	35	22,0	0,5
АТДЦТН-200000/330	200	80	330	115	6,6; 11,0; 15,75; 38,5	180	600	10,0	34	22,5	0,5

в) Автотрансформаторы трехфазные класса напряжения 500 кВ, РПН, соответствующие требованиям ГОСТ 17544-72

АТДЦТН-125000/500	125	50	500	121	6,6; 11,0; 38,5	150	330	10,5	24	13,0	0,5
АТДЦТН-250000/500	250	100	500	121	11,0; 38,5	270	550	10,5	24	13,0	0,45

г) Автотрансформаторы однофазные класса напряжения 500 кВ, РПН, соответствующие требованиям ГОСТ 17544-72

АОДЦТН-167000/500	167	50	500/ $\sqrt{3}$	230/ $\sqrt{3}$	11,0; 38,5	125	325	11	35	21,5	0,4
АОДЦТН-167000/500	167	67	500/ $\sqrt{3}$	230/ $\sqrt{3}$	13,8	125	325	9,5	29,0	17,5	0,4
АОДЦТН-167000/500	167	83	500/ $\sqrt{3}$	230/ $\sqrt{3}$	15,75; 20,0	125	325	9,5	29,0	17,5	0,4
АОДЦТН-167000/500	167	33	500/ $\sqrt{3}$	330/ $\sqrt{3}$	11,0; 38,5	70	320	9,5	67,0	61,0	0,3
АОЦТН-267000/500	267	67	500/ $\sqrt{3}$	230/ $\sqrt{3}$	11,0; 13,8; 38,5	160	420	8,5	23,0	12,5	0,35
АОЦТН-267000/500	267	83	500/ $\sqrt{3}$	230/ $\sqrt{3}$	15,75	160	420	8,5	23,0	12,5	0,35
АОЦТН-267000/500	267	120	500/ $\sqrt{3}$	230/ $\sqrt{3}$	20,0	160	420	8,5	23,0	12,5	0,35

Таблица 22.32. Схемы и группы соединения трансформаторов классов напряжения 6, 10, 35, 110, 220, 330 и 500 кВ

Класс напряже- ния, кВ	Диапазон мощ- ностей, мВ·А	Схема и группа соединения	Класс напряже- ния, кВ	Диапазон мощ- ностей, мВ·А	Схема и группа соединения
Двухобмоточные трансформаторы			Двухобмоточные трансформаторы		
6, 10 и 35	0,025—0,63	Y/Y _H -0	330	32—1000	Y _H /Δ-11
	0,025—0,250	Y/Z _H -11			
6 и 10	0,16—0,63	Δ/Y _H -11	500	250—630	Y _H /Δ-11
6 и 10	0,40—0,63	Δ/Y _H -11			
35	0,63	Y/Δ-11	Трехобмоточные трансформаторы		
6—20	1,0—2,5	Y/Y _H -0	35	6,3—16,0	Y _H /Δ/Δ-11-11
		Y/Δ-11	110	6,3—80	Y _H /Δ/Δ-11-11
35	1,0—2,5	Δ/Y _H -11			Y _H /Y _H /Δ-0-11
		Y/Y _H -0	220	25—63	Y _H /Y/Δ-0-11
6—35	4,0—80,0	Y/Δ-11			
		Y _H /Δ-11	Трехобмоточные автотрансформаторы		
110	2,5—400	Y _H /Δ-11	220	32—250	Y _{авто} /Δ-0-11
220	32—630	Y _H /Δ-11	330	63—200	Y _{авто} /Δ-0-11
			500	125—250	Y _{авто} /Δ-0-11

Примечание. Схема и группа соединения зависят от сочетания напряжений ВН и НН и могут быть уточнены по соответствующему ГОСТ.

ми потерями $p_{1,5/50}$ не более 1,1 Вт/кг. Стандартами предусмотрен также уровень А потерь холостого хода меньше уровня Б на 13—18 %, обусловленный применением стали с удельными потерями 0,9 Вт/кг.

Эти замечания относятся также к параметрам и другим данным трансформаторов и автотрансформаторов, содержащимся в табл. 22.30 и 22.31.

Двухобмоточные масляные трансформаторы классов напряжения 6, 10 и 35 кВ по табл. 22.29, а от 0,025 до 0,63 МВ·А, отвечающие требованиям ГОСТ 12022-76, могут иметь напряжения (ВН) 6,0; 10,0 и 35,0 кВ и напряжения (НН) 0,4 кВ (все типы) и 0,69 кВ при мощностях от 0,16 до 0,63 МВ·А. Трансформатор типа ТМН-630/35 может также иметь напряжения (НН) 6,3 или 11 кВ. Стандарт допускает изготовление трансформаторов для существующих сетей с другими напряжениями (НН) (например, 0,23 или 0,525 кВ) при увеличении потерь короткого замыкания на +5 %, а также с напряжениями ВН 15,75 и 20,0 кВ со значениями параметров холостого хода и короткого замыкания, как для напряжения 35 кВ.

Схемы и группы соединения трансформаторов: Y/Y_n-0 и Y/Z_n-11 при НН 0,4 кВ; Δ/Y_n-11 при НН 0,69 кВ и при НН 0,4 кВ у трансформаторов ТМ-400/10 и ТМ-630/10. Трансформаторы с соединением обмоток НН в зигзаг имеют напряжение короткого замыкания на 4 % выше и потери короткого замыкания на 15 % выше, чем указано в табл. 22.29,а.

Трансформаторы мощностью от 0,025 до 0,250 МВ·А выпускаются только ПБВ $\pm 2 \times 2,5$ %; мощностью 0,400 и 0,630 МВ·А — ПБВ и РПН. При НН 0,4 и 0,69 кВ трансформаторы РПН имеют потери короткого замыкания на 10 % выше, чем трансформаторы ПБВ. Трансформаторы ПБВ снабжаются переключателем с выведенной рукояткой переключения.

Двухобмоточные трансформаторы по табл. 22.29,б мощностью от 1,0 до 6,3 МВ·А, отвечающие требованиям ГОСТ 11920-73, могут иметь напряжения обмоток ВН 6, 10, 20 и 35 кВ, а трансформаторы мощностью 1,6—6,3 МВ·А также 13,8 и 15,75 кВ. Напряжения обмоток НН 0,40; 0,69 кВ (кроме мощностей 4,0 и 6,3 МВ·А); 3,15; 6,3; 10,5 и 11 кВ. Трансформаторы с НН 0,525; 3,15 и 10,5 кВ выпускаются только ПБВ; с НН 0,4; 0,69 и 6,3 кВ — ПБВ и РПН; с НН 11 кВ — только РПН. Трансформаторы мощностью 10—80 МВ·А с НН 10,5 кВ выпускаются только ПБВ.

Трансформаторы ПБВ имеют регулирование на стороне ВН $\pm 2 \times 2,5$ %; трансформаторы РПН при ВН 6 и 10 кВ в диапазоне регулирования ± 10 % имеют не менее ± 8 ступеней и при ВН 13,8; 15,75; 20 и 35 кВ в диапазоне ± 9 % не менее ± 6 ступеней.

Двухобмоточные трансформаторы ПБВ и РПН имеют одинаковые параметры холостого хода и короткого замыкания, отнесенные к основному ответвлению (средней ступени регулирования) и номинальной мощности трансформатора. Расчетные значения i_k на крайних ступенях регулирования, отнесенные к номинальной мощности трансформатора, для

двух- и трехобмоточных трансформаторов РПН приведены в справочном приложении к ГОСТ 11920-73.

Трехобмоточные трансформаторы по табл. 22.29,в, отвечающие требованиям ГОСТ 11920-73, имеют напряжения СН 10,5; 13,8 и 15,75 кВ, напряжения НН 6,3 кВ. Трансформатор ТМТН-6300/35 имеет РПН на стороне ВН в диапазоне ± 9 % не менее ± 6 ступеней; трансформаторы ТДТН-10000/35 и ТДТН-16000/35 имеют РПН в диапазоне ± 12 % — не менее ± 8 ступеней, СН и НН — без ответвлений.

Трехобмоточные трансформаторы имеют напряжения короткого замыкания: ВН—СН — 7,5 % и СН—НН — 16 при 6,3 МВ·А; ВН—НН — 8,0 %; ВН—НН — 16,5 % и СН—НН — 7,0 % при 10 и 16 МВ·А.

Двухобмоточные повышающие трансформаторы класса напряжения 110 кВ, отвечающие требованиям ГОСТ 12965-74, по табл. 22.29,г имеют напряжение обмоток ВН 121 кВ и обмоток НН: мощности 40 и 80 МВ·А — 3,15 и 6,30 кВ; 40—125 МВ·А — 10,5 кВ; 80—200 МВ·А — 13,8 кВ; 200 и 250 МВ·А — 15,75 кВ; 200 МВ·А — 18 кВ и 400 МВ·А — 200 кВ. Трансформаторы от 40 до 200 МВ·А имеют ПБВ на стороне ВН $\pm 2 \times 2,5$ %; трансформаторы 250 и 400 МВ·А не имеют ответвлений.

Двухобмоточные трансформаторы класса напряжения 110 кВ по табл. 22.29,д имеют напряжение обмотки ВН 115 кВ (ТМН-2500/110 — 110 кВ); обмоток НН: мощности 2,5—16 МВ·А — 6,6 и 11 кВ; 25—80 МВ·А; нерасщепленная обмотка — 38,5 кВ, расщепленная обмотка — $2 \times 6,3$; $2 \times 10,5$ или 6,3 и 10,5 кВ; мощности 125 МВ·А; расщепленная обмотка — $2 \times 10,5$ кВ мощности частей расщепленной обмотки НН — по 50 % номинальной мощности обмотки ВН.

Трансформатор ТМН-2500/110 имеет РПН на стороне НН в диапазоне $+15$ % и -12 %, $+10$ и -8 ступеней; остальные — РПН в нейтрале ВН ± 16 %, ± 9 ступеней.

Трехобмоточные трансформаторы класса напряжения 110 кВ по табл. 22.29,е, отвечающие требованиям ГОСТ 12965-74, имеют напряжение обмотки ВН 115 кВ и обмоток СН 38,5 кВ (все мощности) или 11 кВ (кроме мощностей 6,3; 10 и 16 МВ·А), а обмоток НН — 6,6 кВ при обмотках СН 11 кВ и 6,6 или 11 кВ при обмотках СН 38,5 кВ.

Все трансформаторы этих типов имеют РПН в нейтрале обмотки ВН в диапазоне регулирования ± 16 %, ± 9 ступеней и ПБВ на стороне СН $\pm 2 \times 2,5$ %. Обмотки НН не имеют ответвлений. Напряжения короткого замыкания: ВН—СН — 10,5 %, ВН—НН для 6,3—16 МВ·А — 17,0 %; 25—63 МВ·А — 17,5 % и 80 МВ·А — 18,5 %; СН—НН для 6,3—16 МВ·А — 6,0 %; 25—63 МВ·А — 6,5 % и 80 МВ·А — 7,0 %. Значения напряжения короткого замыкания указаны на основном ответвлении. Расчетные значения напряжения короткого замыкания на крайних ответвлениях диапазона регулирования для двух- и трехобмоточных трансформаторов РПН приведены в справочном приложении ГОСТ 12965-74.

Двухобмоточные повышающие трансформаторы класса напряжения 220 кВ по табл. 22.29,ж, отвечающие требованиям ГОСТ

15957-70, имеют напряжение обмоток ВН 242 кВ и обмоток НН: 6,3 кВ—80 МВ·А; 10,5 кВ—80 и 125 МВ·А; 13,8 кВ—80—400 МВ·А; 15,75 кВ—200—630 МВ·А; 18 кВ—200 МВ·А и 20 кВ—400 и 630 МВ·А. Трансформаторы 80—200 МВ·А имеют ПБВ на стороне ВН $\pm 2 \times 2,5$ %; трансформаторы 250—630 МВ·А не имеют регулировочных ответвлений.

Двухобмоточные трансформаторы класса напряжения 220 кВ с расщепленной обмоткой НН по табл. 22.29, з, отвечающие требованиям ГОСТ 15957-70, имеют напряжение обмотки ВН 230 кВ, а напряжения НН при расщепленных обмотках—6,6—6,6 кВ, или 11—11 кВ, или 6,6—11 кВ (трансформаторы 100 и 160 МВ·А—только 11—11 кВ); при нерасщепленных обмотках НН 38,5 кВ. Все эти трансформаторы имеют РПН в нейтрале обмотки ВН в диапазоне регулирования ± 12 % не менее ± 8 ступеней. Части расщепленной обмотки НН имеют номинальные мощности, равные 50 % номинальной мощности обмотки ВН.

Расчетные значения u_k на крайних ступенях регулирования, отнесенные к номинальной мощности трансформаторов, для двух- и трехобмоточных трансформаторов РПН приведены в справочном приложении к ГОСТ 15957-70.

Трехобмоточные трансформаторы класса напряжения 220 кВ по табл. 22.29, и, отвечающие требованиям ГОСТ 15957-70, РПН, имеют напряжение ВН 230 кВ; СН—22 и 38,5 кВ; НН—6,6 и 11 кВ. Все эти трансформаторы имеют РПН в нейтрале ВН в диапазоне регулирования ± 12 % не менее ± 8 ступеней и ПБВ на стороне СН $\pm 2 \times 2,5$ %. Если номинальный ток на стороне СН превышает 1200 А, то обмотка СН выполняется без ответвлений. Напряжения короткого замыкания: ВН—СН—12,5 %; ВН—НН для трех трансформаторов—на табл. 22.29 соответственно 20, 22 и 24 %; СН—НН—6,5; 9,5 и 10,5 %. Расчетные значения u_k на крайних ступенях регулирования, отнесенные к номинальной мощности трансформатора, для двухобмоточных трансформаторов РПН и трехобмоточных автотрансформаторов РПН приведены в справочном приложении к ГОСТ 17545-72.

Основные параметры двухобмоточных трехфазных трансформаторов классов напряжения 330 и 500 кВ, отвечающих требованиям ГОСТ 17545-72 и ГОСТ 17544-72, приведены в табл. 22.30.

Основные параметры трехобмоточных трехфазных и однофазных автотрансформаторов классов напряжения 220, 330 и 500 кВ, отвечающих требованиям ГОСТ 15957-70, ГОСТ 17545-72 и ГОСТ 17544-72, приведены в табл. 22.31. Мощности обмоток ВН и СН этих автотрансформаторов равны номинальным мощностям автотрансформаторов каждая; мощности обмоток НН—от 20 до 50 % номинальной мощности. Обмотки ВН и СН имеют общую часть. Обмотка НН с другими обмотками гальванически не связана.

Трехфазные автотрансформаторы классов напряжения 220 и 330 кВ по табл. 22.31, а, б имеют РПН на стороне СН в линии в диапазоне регулирования ± 12 % не менее ± 6 ступеней.

Трехфазные и однофазные автотрансформаторы класса напряжения 500 кВ по табл. 22.31, в, г имеют РПН на стороне СН в линии—трехфазные в диапазоне регулирования $\pm (11 \div 12)$ % не менее ± 6 ступеней; однофазные—в диапазоне $\pm (11,2 \div 12,36)$ %; $\pm (6 \div 8)$ ступеней.

Схемы и группы соединений трансформаторов классов напряжения 6, 10, 35, 110, 220, 330 и 500 кВ приведены в табл. 22.32.

Трансформаторы с естественным воздушным охлаждением сухие предназначены для установки в сухих закрытых помещениях с относительной влажностью воздуха не выше 80 % при отсутствии в атмосфере помещения агрессивных веществ и пыли.

В табл. 22.33 приведены данные сухих трансформаторов общего назначения мощностью от 10 до 160 кВ·А на напряжения до 660 В, отвечающих требованиям ГОСТ 18619-80.

Сухие трансформаторы больших мощностей и классов напряжения находят все более широкое применение в установках внутри жилых зданий, в промышленных цехах, лабораториях и т. п.

В табл. 22.34 приведены данные сухих пожаробезопасных трехфазных силовых трансформаторов классов напряжения от 6 до 15,75 кВ мощностью от 160 до 1600 кВ·А, отвечающих требованиям ГОСТ 14074-76. Трансформаторы общего назначения в пределах класса напряжения 10 кВ могут иметь ВН 6,0; 6,3; 10,0 и 10,5 кВ, кроме мощностей 250, 1000 и 1600 кВ·А, у которых ВН 6,0 или 10,0 кВ. Напряжения НН—0,23; 0,40 и

Таблица 22.33. Трансформаторы силовые трехфазные сухие защищенные общего назначения мощностью от 10 до 160 кВ·А на напряжение до 660 В, отвечающие требованиям ГОСТ 18619-80

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ·А	u_k , %	Потери, Вт		i_0 , %	Масса трансформатора, кг	Размеры, мм		
			P_x	P_k			Высота	Длина	Ширина
ТСЗ-10/0,66	10	4,5	90	280	7,0	150	650	700	440
ТСЗ-16/0,66	16	4,5	125	400	5,8	180	680	760	480
ТСЗ-25/0,66	25	4,5	180	560	4,8	240	720	820	520
ТСЗ-40/0,66	40	4,5	250	800	4,0	320	820	890	540
ТСЗ-63/0,66	63	4,5	355	1090	3,3	440	920	970	580
ТСЗ-100/0,66	100	4,5	500	1500	2,7	580	980	1060	620
ТСЗ-160/0,66	160	4,5	710	2060	2,3	800	1150	1150	680

Примечания: 1. Номинальные напряжения ВН—380, 500 и 660 В; НН—230 и 400 В.
2. Обмотки ВН соединены в звезду; начала и концы обмоток фаз НН выведены на панель зажимов, что позволяет соединять обмотки НН в звезду или треугольник.
3. Обмотки ВН—ПБВ ± 5 %.

Таблица 22.34. Трансформаторы силовые трехфазные сухие защищенные общего назначения от 160 до 1600 кВ·А на напряжение от 6 до 15,75 кВ, отвечающие требованиям ГОСТ 14074-76

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ·А	μ_k , %	Потери, Вт		i_0 , %	Масса трансформатора, кг	Размеры, мм		
			P_x	P_k			Высота	Длина	Ширина
ТСЗ-160/10	160	5,5	700	2700	4,0	1400	1700	1800	950
ТСЗ-250/10	250	5,5	1000	3800	3,5	1800	1850	1850	1000
ТСЗ-400/10	400	5,5	1300	5400	3,0	2400	2150	2250	1000
ТСЗ-630/10	630	5,5	2000	7300	1,5	3400	2300	2250	1100
ТСЗ-1000/10	1000	5,5	3030	11 200	1,5	4600	2250	2400	1350
ТСЗ-1600/10	1600	5,5	4200	16 000	1,5	6500	3200	2650	1350
ТСЗ-250/15	250	8,0	1100	4440	4,0	2200	1850	2300	1200
ТСЗ-400/15	400	8,0	1400	6000	3,5	2700	2150	2450	1200
ТСЗ-630/15	630	8,0	2300	8700	2,0	4000	2350	2450	1350
ТСЗ-1000/15	1000	8,0	3200	12 000	2,0	5000	2750	2550	1350
ТСЗ-1600/15	1600	8,0	4300	16 000	2,0	6800	3230	2600	1350
Трансформаторы для собственных нужд электростанций									
ТСЗС-630/10	630	8,0	2000	8500	2,0	3900	2300	2250	1100
ТСЗС-1000/10	1000	8,0	3000	12 000	2,0	5600	2550	2400	1350

Таблица 22.35. Виды охлаждения трансформаторов

Вид охлаждения	Условное обозначение	Вид охлаждения	Условное обозначение
Сухие трансформаторы			
Естественное воздушное при открытом исполнении	С	Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла	МЦ
Естественное воздушное при защищенном исполнении	СЗ	Принудительная циркуляция воздуха и масла	ДЦ
Естественное воздушное при герметичном исполнении	СГ	Принудительная циркуляция воды и естественная циркуляция масла	МВ
Воздушное с дутьем	СД	Принудительная циркуляция воды и масла	Ц
Масляные трансформаторы			
Естественная циркуляция масла и воздуха	М	Трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком	
Принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла	Д	Естественное охлаждение негорючим жидким диэлектриком	Н
		Охлаждение негорючим жидким диэлектриком с дутьем	НД

0,69 кВ для мощностей 160—400 кВ·А и 0,40 и 0,69 кВ для остальных. При классе напряжения 15 кВ напряжения ВН 13,8 и 15,75 кВ, напряжения НН — 0,40 кВ. Трансформаторы собственных нужд электростанций имеют ВН 6,0; 6,3; 10,0 и 10,5 кВ и НН 0,4 кВ.

Обмотки трансформаторов серии ТСЗ выполняются из алюминиевого, а серии ТСЗС — из медного провода с изоляцией класса нагревостойкости В по ГОСТ 8865-70. Все трансформаторы имеют ПБВ $\pm 2 \times 2,5$ %, осуществляемое путем перестановки контактных пластин на панели зажимов, расположенной внутри кожуха. Каждый трансформатор имеет защитный кожух, предохраняющий активную часть трансформатора от попадания посторонних предметов и допускающий доступ охлаждаемого воздуха. Виды охлаждения трансформаторов приведены в табл. 22.35.

22.30. ТРАНСФОРМАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Трансформатором малой мощности называется трансформатор с выходной мощностью 4 кВ·А и ниже для однофазных, 5 кВ·А и ниже для трехфазных трансформаторов. Эти трансформаторы применяются в устройствах радиотехники, электроники, автоматики, связи, промышленного электропривода, для понижения напряжения в рабочих цепях с целью

обеспечения безопасной работы, для питания бытовых электроприборов и т. д. Номенклатура назначений и типов этих трансформаторов чрезвычайно многообразна.

Ниже приводятся характеристики и параметры широко применяемых типов трансформаторов малой мощности, поставляемых по заказам и предназначенных для питания цепей управления электроприводов, ламп местного освещения, низковольтных цепей сигнализации и выпрямителей, собранных по двухполупериодной схеме (схемы рис. 22.38).

Трансформаторы изготавливаются в соответствии с ГОСТ 16710-76 с типовым обозначением ОСМ — однофазные, сухие, многоцелевого назначения, в климатическом исполнении согласно ГОСТ 15150-69, для умеренного климата — УЗ для температуры окружающей среды от -45 до $+40^\circ\text{C}$; тропикостойкие — ТЗ от -10 до $+45^\circ\text{C}$ и холодоустойкие — ХЛЗ от -60 до $+40^\circ\text{C}$. Конструкция, электрические параметры, габаритные и установочные размеры для трех исполнений одинаковы. Допустимое превышение напряжения для питающей сети — до $+10\%$, для тока нагрузки — до $+5\%$ при сохранении мощности не выше номинальной. Вибрация мест крепления трансформаторов — с частотой до 60 Гц и ускорением не более 10 м/с^2 .

Номинальные первичные напряжения — 220, 380 и 660 В, вторичные — по табл. 22.36—22.39. Возможно сочетание любого из указан-

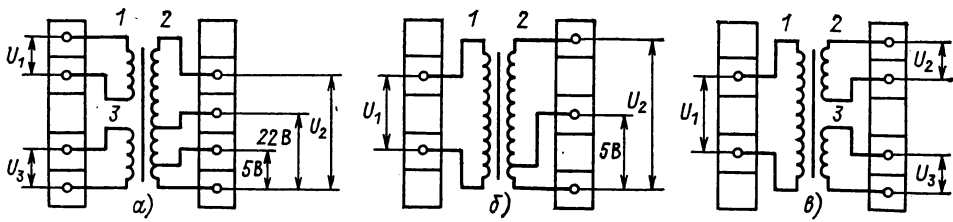


Рис. 22.38. Схемы обмоток трансформаторов серии ОСМ

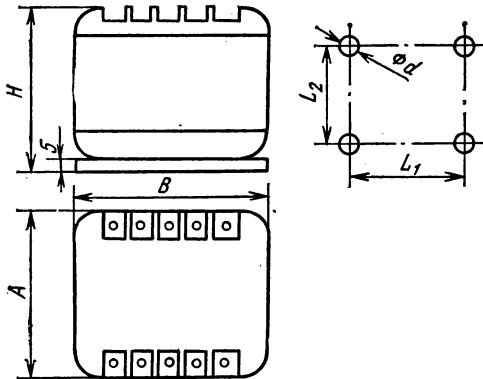


Рис. 22.39. Габаритные и установочные размеры трансформаторов серии ОСМ

Таблица 22.36. Трансформаторы, предназначенные для работы в цепях динамического торможения
Схема рис. 22.38, а

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ·А		Номинальные напряжения обмоток 2 и 3, В
	трансформатора	вторичной обмотки 2 или 3	
ОСМ-0,063	0,063	0,0315	14, 29, 56, 82
ОСМ-0,1	0,100	0,0500	
ОСМ-0,16	0,160	0,0800	
ОСМ-0,25	0,250	0,1250	
ОСМ-0,4	0,400	0,2000	
ОСМ-0,63	0,630	0,3150	
ОСМ-1,0	1,000	0,5000	

Таблица 22.37. Трансформаторы, предназначенные для питания цепей управления, сигнализации и местного освещения
Схема рис. 22.38, а

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ·А		Номинальные напряжения обмоток, В	
	трансформатора	вторичных обмоток	управления 2	освещения 3
		управления 2		
ОСМ-0,1	0,100	0,075	0,025	110, 220
ОСМ-0,16	0,160	0,100	0,060	
ОСМ-0,25	0,250	0,190	0,060	
ОСМ-0,4	0,400	0,340	0,060	
ОСМ-0,63	0,630	0,510	0,120	
ОСМ-1,0	1,000	0,880	0,120	

ных первичных напряжений с любым из вторичных (любыми при двух вторичных обмотках). Токи холостого хода и напряжения короткого замыкания — по табл. 22.40, габаритные размеры и массы — по рис. 22.39 и табл. 22.41.

Таблица 22.38. Трансформаторы, предназначенные для питания выпрямителей цепей управления
Схема рис. 22.38, б

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ·А	Напряжение вторичной обмотки 2, В	
		номинальное	после выпрямления*
ОСМ-0,063	0,063	14, 29, 56, 130, 260	12, 24, 48, 110, 220
ОСМ-0,1	0,100		
ОСМ-0,16	0,160		
ОСМ-0,25	0,250		
ОСМ-0,4	0,400		

* Справочные данные для двухполупериодной схемы выпрямления.

Таблица 22.39. Трансформаторы, предназначенные для питания цепей местного освещения или цепей управления (рис. 22.38, б)

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ·А	Номинальное напряжение обмотки 2, В
ОСМ-0,063	0,063	12, 24, 36, 42, 110, 220
ОСМ-0,1	0,100	
ОСМ-0,16	0,160	
ОСМ-0,25	0,250	
ОСМ-0,4	0,400	
ОСМ-0,63	0,630	110, 220
ОСМ-1,0	1,000	

Таблица 22.40. Параметры трансформаторов ОСМ

Тип трансформатора	Ток холостого хода, %	Напряжение короткого замыкания, %
ОСМ-0,063	24	12,0
ОСМ-0,1	24	9,0
ОСМ-0,16	23	7,0
ОСМ-0,25	22	5,5
ОСМ-0,4	20	4,5
ОСМ-0,63	19	3,5
ОСМ-1,0	18	2,5

Примечание. Допуск для тока холостого хода +30 %, для напряжения короткого замыкания +10 %.

Таблица 22.41. Габаритные размеры и массы трансформаторов типа ОСМ, размеры—в мм

Тип трансформатора	A	B	H	L ₁	L ₂	d	Масса, кг
ОСМ-0,063 ОСМ-0,1	75 90	90	95 100	52	58 73	5,5	1,30 1,90
ОСМ-0,16 ОСМ-0,25	92 108	110	115 135	60	77		2,85 4,10
ОСМ-0,4	110	140	145	80	90		5,85
ОСМ-0,63 ОСМ-1,0	120 152	170	175	105	95 125	6,5	9,10 13,76

22.31. СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ТРАНСФОРМАТОРОСТРОЕНИИ

В настоящее время действуют следующие основные государственные стандарты на силовые трансформаторы общего назначения:

- ГОСТ 16110-80. Трансформаторы силовые. Термины и определения.
- ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
- ГОСТ 18619-80. Трансформаторы силовые трехфазные с естественным воздушным охлаждением общего назначения мощностью от 10 до 160 кВ·А на напряжение до 660 В.
- ГОСТ 14074-76. Трансформаторы силовые трехфазные сухие защищенные общего назначения мощностью от 160 до 1600 кВ·А на напряжение от 6 до 15,75 кВ включительно.
- ГОСТ 12022-76. Трансформаторы трехфазные силовые масляные общего назначения мощностью от 25 до 630 кВ·А на напряжение до 35 кВ включительно.
- ГОСТ 11920-73. Трансформаторы трехфазные силовые масляные общего назначения мощностью от 1000 до 80 000 кВ·А на напряжение до 35 кВ включительно.
- ГОСТ 12965-74. Трансформаторы трехфазные силовые масляные общего назначения класса напряжения 110 кВ.
- ГОСТ 17546-72. Трансформаторы (и автотрансформаторы) трехфазные силовые масляные общего назначения класса напряжения 150 кВ.

ГОСТ 15957-70. Трансформаторы (и автотрансформаторы) трехфазные силовые масляные общего назначения класса напряжения 220 кВ.

ГОСТ 17545-72. Трансформаторы (и автотрансформаторы) силовые масляные общего назначения класса напряжения 330 кВ.

ГОСТ 17544-72. Трансформаторы (и автотрансформаторы) силовые масляные общего назначения класса напряжения 500 кВ.

ГОСТ 3484-77. Трансформаторы силовые. Методы испытаний.

ГОСТ 1516.1-76. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.

ГОСТ 1516.2-76. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.

ГОСТ 14209-84. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки.

СТ СЭВ 1071-78. Электрооборудование и электроустановки. Термины, определения и общие условия испытания высоким напряжением.

СТ СЭВ 1072-78. Электрооборудование и электроустановки. Методы испытания высоким напряжением.

ГОСТ 12.2.007.2-00. Система стандартов безопасности труда. Трансформаторы силовые и реакторы электрические. Требования безопасности.

Список литературы

- 22.1. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. 1. М.: Энергия, 1974. 240 с.
- 22.2. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. М.: Энергия, 1976. 544 с.
- 22.3. Испытание мощных трансформаторов и реакторов/Г. В. Алексеев, А. К. Ашратов, Е. В. Веремей, Е. С. Фрид. М.: Энергия, 1978. 520 с.
- 22.4. Каганович Е. А., Райхлин И. М. Испытания трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А и напряжением до 35 кВ. М.: Энергия, 1980. 312 с.
- 22.5. Фарбман С. А., Бун А. Ю. и Райхлин И. М. Ремонт и модернизация трансформаторов. М.: Энергия, 1976. 616 с.
- 22.6. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. М.: Энергия, 1970. 429 с.
- 22.7. Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981. 429 с.

Раздел 23

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

СОДЕРЖАНИЕ

А. Основные определения, технические требования	
23.1. Основные обозначения (встречающиеся в разд. 23—25)	223
23.2. Определение электрической машины. Классификация по функциональному назначению	225
23.3. Разновидности электрических машин по характеру перемещения и форме подвижных частей	225

23.4. Необходимое условие получения электромеханического преобразования энергии	227
23.5. Способы получения периодического изменения магнитного поля в электрической машине	227
23.6. Возможные исполнения электрических машин и классификация по принципу действия	228
23.7. Классификация электрических машин по конструктивному исполнению, степени защиты и способу охлаждения	230

23.8. Общие определения (по ГОСТ 183-74 и ГОСТ 17154-71)	233	Б. Общие вопросы теории и проектирования	
23.9. Технические требования, предъявляемые к электрическим машинам (по ГОСТ 183-74)	235	23.21. Главные размеры, машинная постоянная, электромагнитные нагрузки	245
23.10. Предельно допустимые превышения температуры частей электрической машины (по ГОСТ 183-74)	237	23.22. Якорные обмотки машин переменного тока	246
23.11. Электрическая прочность и сопротивление изоляции обмоток электрических машин (по ГОСТ 183-74)	239	23.23. Якорные обмотки машин постоянного тока	253
23.12. Потери мощности и КПД электрических машин	240	23.24. Обмотки возбуждения	255
23.13. Обозначения выводов обмоток (по ГОСТ 183-74)	240	23.25. Короткозамкнутые обмотки типа беличьей клетки	256
23.14. Номинальные частоты вращения электрических машин (по ГОСТ 10683-73)	241	23.26. ЭДС, МДС и поле многофазных обмоток	256
23.15. Высоты оси вращения электрических машин (по ГОСТ 13267-73)	242	23.27. МДС и поле обмоток возбуждения	263
23.16. Концы валов цилиндрические (по ГОСТ 12080-66)	242	23.28. Активные сопротивления обмоток	265
23.17. Концы валов конические (по ГОСТ 12081-72)	243	23.29. Индуктивные сопротивления обмоток	266
23.18. Испытания электрических машин (по ГОСТ 183-74 и ГОСТ 11828-75)	243	В. Применение вычислительной техники при проектировании электрических машин	
23.19. Надежность электрических машин	244	23.30. Общие вопросы создания автоматизированных систем проектирования электрических машин (САПР ЭМ)	269
23.20. Основные стандарты на электрические машины	245	23.31. Математическое моделирование электрических машин	273
		Список литературы	274

А. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

23.1. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ (ВСТРЕЧАЮЩИЕСЯ В РАЗД. 23—25)

A — линейная нагрузка статора (якоря);	машины и его активная и реактивная составляющие;
a — число параллельных ветвей обмотки (в машинах постоянного тока 2а);	$I_{\text{хТ}}$ — ток холостого хода в ветви намагничивания Т-образной схемы замещения асинхронной машины;
$a_{\text{в}}$ — высота элементарного проводника;	I_{fx} — ток возбуждения синхронной машины, соответствующий напряжению $U_{\text{н}}$ в режиме холостого хода;
B — магнитная индукция;	J — момент инерции;
$b_{\text{в}}$ — ширина радиального вентиляционного канала;	K — число коллекторных пластин;
$b_{\text{п}}, b_{\text{з}}$ — ширина паза, ширина зубца;	$k_{\text{в}}$ — коэффициент формы кривой индукции;
$b_{\text{ск}}$ — скос пазов;	$k_{\text{н}}$ — коэффициент насыщения магнитной цепи;
$b_{\text{ш}}$ — ширина шлица паза;	$k_{\text{за}}$ — коэффициент насыщения сердечника статора;
$b_{\text{р}}, b_{\text{д}}$ — реальная и расчетная полюсные дуги;	$k_{\text{ск}}$ — коэффициент скоса пазов;
$b_{\text{с}}$ — ширина элементарного проводника;	$k_{\omega}, k_{\gamma}, k_{\text{р}}$ — обмоточный коэффициент, коэффициент укорочения, коэффициент распределения;
$C_{\text{А}}$ — машинная постоянная;	$k_{\text{д}}$ — коэффициент демпфирования;
$c_{\text{е}}$ — отношение $E/\Phi\Omega$;	k_{I} — кратность пускового тока;
$c_{\text{М}}$ — отношение $M/\Phi I_{\text{я}}$;	$k_{\text{М}}$ — кратность пускового момента;
C_{v} — коэффициент влияния пазов для в-й гармонической;	k_{x} — коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления;
D — внутренний диаметр сердечника статора (в машинах постоянного тока внешний диаметр якоря);	k_{r} — коэффициент увеличения активного сопротивления;
$D_{\text{а}}$ — внешний диаметр сердечника статора;	$k_{\text{с}}$ — коэффициент заполнения сердечника сталью;
E — действующее значение ЭДС фазы обмотки; ЭДС обмотки якоря;	$k_{\text{д}}$ — коэффициент воздушного зазора;
$E_{2\text{s}}$ — ЭДС фазы обмотки вращающегося ротора асинхронной машины;	k_{Φ} — коэффициент потока обмотки возбуждения;
F — МДС обмотки, магнитное напряжение участка магнитной цепи;	k_{f} — коэффициент формы поля обмотки возбуждения;
$F_{\text{а}}, F_{\text{д}}, F_{\text{q}}$ — МДС трехфазной обмотки и ее продольная и поперечная составляющие;	$k_{\text{д}}, k_{\text{q}}$ — коэффициенты формы поля по продольной и поперечной осям;
f — частота тока;	$k_{\text{kd}}, k_{\text{kq}}$ — коэффициенты формы поля демпферной обмотки по продольной и поперечной осям;
G — масса;	$k_{\text{ад}}, k_{\text{ад}}$ — коэффициенты реакции якоря по продольной и поперечной осям;
H — напряженность магнитного поля;	$k_{\text{а}}$ — коэффициент реакции якоря неявнополюсной машины;
I — ток (действующее значение переменного тока);	
$I_{\text{п}}$ — пусковой ток;	
$I_{\text{x}}, I_{\text{а}}, I_{\text{r}}$ — ток холостого хода асинхронной	

L — длина последовательно включенных проводников фазы;
 l_1, l_0 — реальная и расчетная длины сердечника якоря;
 l_m — суммарная длина пакетов стали;
 l — длина пакета сердечника;
 M — электромагнитный вращающий момент;
 M_{Π} — пусковой момент;
 m_3 — число элементарных проводников по высоте паза;
 m — число фаз обмотки;
 N — число эффективных проводов якоря машины постоянного тока;
 n — частота вращения ротора, частота вращения магнитного поля в синхронной машине, об/мин;
 n_1 — частота вращения магнитного поля в асинхронной машине, об/мин;
 n_B — число радиальных вентиляционных каналов в сердечнике;
 P — активная мощность; потери мощности;
 P_c — удельная синхронизирующая мощность;
 p — число пар полюсов обмотки;
 Q — реактивная мощность;
 q — число пазов на полюс и фазу;
 q_3 — эквивалентное число пазов на полюс и фазу дробной обмотки;
 r — активное сопротивление;
 r_{12} — фиктивное активное сопротивление ветви холостого хода в схеме замещения асинхронной машины;
 r_{kd}, r_{kq} — активные сопротивления демпферной обмотки по продольной и поперечной осям;
 S — полная мощность; число секций в обмотке машины постоянного тока;
 S_p — расчетная мощность;
 s — скольжение;
 $s_{кр}$ — критическое скольжение;
 T — электромагнитная постоянная времени; период;
 t — время; температура;
 t_2 — зубцовое деление;
 U — напряжение на выводах (действующее значение переменного напряжения);
 u_{Π} — число эффективных проводников в пазу;
 u_c — число секций на один паз;
 w — число последовательно включенных витков фазы обмотки;
 w_c — число витков в секции;
 x — индуктивное сопротивление;
 x_{12} — сопротивление взаимной индукции фазы обмотки;
 x_{ad}, x_{aq} — сопротивления взаимной индукции обмотки якоря синхронной машины по продольной и поперечной осям;
 x_{σ} — индуктивное сопротивление рассеяния;
 x_P — индуктивное сопротивление Потье;
 $x_{f\sigma}$ — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения;
 $x_{k\sigma d}, x_{k\sigma q}$ — индуктивные сопротивления рассеяния демпферной обмотки по продольной и поперечной осям;

x_d — индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния;
 x_d — индуктивное сопротивление лобового рассеяния;
 x_2 — индуктивное сопротивление обратной последовательности;
 x_0 — индуктивное сопротивление нулевой последовательности;
 y — шаг обмотки;
 Z — число пазов;
 Z_3 — число элементарных пазов якоря;
 Z_2 — число пазов ротора; число пазов неявнополюсного ротора, занятых обмоткой возбуждения;
 α — угол сдвига фаз ЭДС соседних пазов; относительная полюсная дуга;
 α_0 — расчетный коэффициент полюсной дуги;
 β — относительный шаг обмотки;
 γ — коэффициент заполнения окружности ротора обмоткой возбуждения;
 δ — радиальный размер воздушного зазора;
 δ' — радиальный размер эквивалентного воздушного зазора;
 η — коэффициент полезного действия;
 λ — отношение расчетной длины сердечника к полюсному делению; коэффициент магнитной проводимости;
 Λ — удельная магнитная проводимость;
 ξ — приведенная высота проводника;
 ν — порядковый номер гармонической;
 ρ — удельное сопротивление;
 τ — полюсное деление;
 Φ — магнитный поток взаимной индукции;
 φ — угол между векторами тока и напряжения;
 Ψ — потокоцепление обмотки;
 ψ — угол между векторами тока и ЭДС;
 θ — угол между $\vec{E}$ и $\vec{U}$;
 Ω — угловая скорость ротора; угловая скорость магнитного поля в синхронной машине;
 Ω_1 — угловая скорость магнитного поля в асинхронной машине.

Н и ж н и е и н д е к с ы

Режимы, процессы

ном — номинальный режим;
 х — режим холостого хода;
 к — режим короткого замыкания;
 п — пусковой процесс;
 уг — угловая частота вращения.

Характер величины

l — линейное значение;
 ϕ — фазное значение;
 max — максимальное значение;
 min — минимальное значение;
 $ср$ — среднее значение;
 $б$ — базисное значение величины;
 * — индекс для величины в относительных единицах;
 осн — основная гармоническая;
 ν — ν -я гармоническая.

Части машины, участки магнитной цепи, оси

- 1 — статор;
- 2 — ротор;
- A, B, C — фазы трехфазной обмотки;
- z1, (z), z2 — зубцы статора (якоря) и ротора;
- p1, p2 — пазы статора, ротора;
- a1, a2 — ярма статора (якоря) и ротора;
- m — сердечник полюса;
- p — наконечник полюса;
- mb — подполюсный зазор;
- a — обмотка статора машины переменного тока; ярмо якоря машины постоянного тока;
- f — обмотка возбуждения синхронной машины;
- k — демпферная обмотка;
- c — стержень демпферной обмотки;
- г — головка зубца;
- d — продольная ось;
- q — поперечная ось;
- s — станина;
- б — зазор между главным полюсом и якорем;
- в — параллельная обмотка возбуждения;
- д — обмотка дополнительных полюсов;
- к — коллектор;
- п — последовательная обмотка возбуждения;
- щ — щетка;
- я — якорь.

Верхний индекс

Штрих — индекс величины, приведенной к обмотке статора.

Единицы величин

Все расчетные формулы в разд. 23—25, если это специально не оговорено, составлены применительно к системе СИ (см. разд. 1).

23.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ФУНКЦИОНАЛЬНОМУ НАЗНАЧЕНИЮ

Электрическая машина — основной преобразователь механической энергии в электрическую и электрической в механическую. От других электромеханических преобразователей электрические машины отличаются тем, что в них, за редким исключением, совершается одностороннее непрерывное преобразование энергии.

По назначению электрические машины могут быть разделены на генераторы, служащие для преобразования механической энергии в электрическую, двигатели, используемые для преобразования электрической энергии в механическую, преобразователи, предназначенные для преобразования электрической энергии с одними параметрами (род тока, напряжение, частота, число фаз переменного тока) в электрическую энергию с другими параметрами.

Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах основано на явлении электромагнитной индукции и связано с электродвижущими силами (ЭДС), которые индуктируются в процессе периодического изме-

нения магнитного поля, происходящем при механическом перемещении обмоток или элементов магнитопровода.

Электрические машины, действие которых основано на законе электромагнитной индукции, называются индуктивными. Возможно также создание электрических машин, в которых энергия преобразуется посредством электрического поля (емкостные машины), однако такие машины существенного практического распространения не имеют, поскольку по своим массогабаритным и стоимостным показателям редко могут конкурировать с индуктивными машинами.

Простейшим и наиболее распространенным индуктивным преобразователем, с помощью которого переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток другого напряжения, является трансформатор. Его обмотки и магнитопровод взаимно неподвижны, и процесс периодического изменения магнитного поля, в результате которого в обмотках индуктируются ЭДС, осуществляется в трансформаторе только за счет периодического изменения тока в обмотках.

Индуктивные преобразователи электрической энергии, в которых имеются движущиеся части, называются электромашинными преобразователями.

В зависимости от рода тока электрические машины подразделяются на машины постоянного и переменного тока. Трансформатор и простейшая электрическая машина могут преобразовывать только электрическую энергию переменного тока, которая поступает из сети с переменным напряжением, изменяющимся с частотой f .

Для того чтобы преобразовать с помощью трансформатора или электрической машины электрическую энергию постоянного тока, нужно превратить ее с помощью преобразователя частоты (ПЧ) того или иного типа в электрическую энергию переменного тока. Такой преобразователь может быть полупроводниковым, а в электрических машинах — также и механическим (в виде коллектора, пластины которого соединены с катушками вращающейся обмотки, и неподвижных щеток, касающихся пластин).

Классификация индуктивных преобразователей энергии по их функциональному назначению приводится в табл. 23.1.

23.3. РАЗНОВИДНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ХАРАКТЕРУ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ФОРМЕ ПОДВИЖНЫХ ЧАСТЕЙ

Индуктивная электрическая машина состоит из двух основных частей: неподвижной и подвижной. Неподвижная часть, статор, состоит из сердечника той или иной конфигурации, одной или нескольких обмоток и конструктивных деталей, с помощью которых всем элементам статора придается определенное положение в пространстве.

Подвижная часть состоит из сердечника, одной или нескольких обмоток, а также конструктивных деталей, с помощью которых

Т а б л и ц а 23.1

Наименование	Структурная схема	Функциональное назначение
Трансформатор		Преобразование переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения
Преобразователь переменного тока в постоянный (выпрямитель)		Преобразование переменного тока в постоянный (или обратное преобразование)
Преобразователь постоянного тока		Преобразование постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения
Электрическая машина переменного тока		Преобразование электрической энергии переменного тока в механическую энергию (или обратное преобразование)
Электрическая машина постоянного тока (вентильная или коллекторная)		Преобразование электрической энергии постоянного тока в механическую энергию (или обратное преобразование)
Электромашинный преобразователь переменного тока (или электрическая машина двойного питания)		Преобразование электрической энергии переменного тока частоты f1 в электрическую энергию переменного тока частоты f2 ≠ f1 и в механическую энергию (или преобразование в любом другом направлении)
Электромашинный преобразователь переменного тока в постоянный		Преобразование электрической энергии переменного тока частоты f2 в электрическую энергию постоянного тока и в механическую энергию (или преобразование в любом другом направлении)
Электромашинный преобразователь постоянного тока		Преобразование электрической энергии постоянного тока одного напряжения U1 в электрическую энергию постоянного тока другого напряжения U2 ≠ U1 и в механическую энергию (или преобразование в любом другом направлении)

обеспечивается перемещение подвижной части относительно неподвижной в определенном направлении и передается сопряженной машине преобразованная механическая энергия.

Машины, в которых подвижная часть вращается, изменяя свое угловое положение относительно статора, называются вращающимися, а их подвижная часть — ротором.

Наиболее распространены цилиндрические вращающиеся машины, в которых цилиндрический ротор располагается внутри статора, имеющего форму полого цилиндра.

В ряде случаев находят применение машины с внешним ротором, в которых не-

подвижный статор располагается внутри ротора.

При исполнении вращающейся машины, когда статор и ротор имеют форму дисков, обращенных друг к другу плоскими торцевыми поверхностями, машины называют торцевыми.

Реже применяются электрические машины, в которых подвижная часть перемещается поступательно, изменяя свое линейное положение относительно статора. Такие машины называются линейными и имеют два возможных исполнения: плоское или цилиндрическое.

В ряде случаев в машину встраивается преобразователь частоты вращения, представляя с ней единое целое.

23.4. НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

ЭДС, индуцируемые в контурах обмоток машины, представляются в виде сумм ЭДС различной природы: трансформаторных ЭДС, связанных с изменением токов в обмотках при фиксированных взаимных индуктивностях, и ЭДС вращения, связанных с изменением индуктивностей при фиксированных токах.

Электрохимическое преобразование энергии связано только с ЭДС вращения, трансформаторные ЭДС в этом преобразовании участия не принимают.

В машине с линейной магнитной цепью (при допущении о бесконечно большой проницаемости материала сердечников) электромагнитный момент равен частной производной энергии магнитного поля по углу поворота ротора при фиксированных токах в контурах. Если эта производная положительна, то момент направлен в сторону вращения и происходит преобразование электрической энергии в механическую; если производная отрицательна, то происходит обратное преобразование.

Непременным условием осуществления в машине электрохимического преобразования является изменение индуктивностей при повороте ротора.

Для получения однонаправленного непрерывного механического преобразования требуется, чтобы токи в обмотках изменялись таким образом, чтобы не только мгновенные, но и средние значения электромагнитного момента и механической мощности были достаточно велики.

Поскольку в технически осуществимых конструкциях магнитные поля, потокоцепления, индуктивности и взаимные индуктивности не могут быть монотонно возрастающими функциями токов и угла поворота ротора γ , единственно возможным является случай их периодического изменения в функции угла γ . Мощность, расходуемая на изменение энергии магнитного поля, в среднем равна нулю, так как во вращающейся машине все величины (токи, индуктивности, взаимные индуктивности и т. д.) изменяются периодически. Через интервал времени, равный одному периоду, все величины, в том числе энергия магнитного поля, снова приобретают те же значения, которые имели в начале периода.

Для получения периодической зависимости параметров от угла поворота ротора необходимо, чтобы при протекании тока по обмотке образовывалось магнитное поле, периодически изменяющееся в пространстве (в тангенциальном направлении вдоль зазора).

23.5. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЕ

Получить периодические поля позволяют следующие сочетания конструкции обмоток и сердечников.

Цилиндрическая (барабанная) разноименнополюсная обмотка. Проводники такой обмотки размещаются в пазах на цилиндрической или торцевой (в торцевых машинах) поверхности сердечника, имеющего форму цилиндра или кольцевого цилиндра (тороида) (рис. 23.1). Для этой обмотки характерно периодическое чередование направлений токов в про-

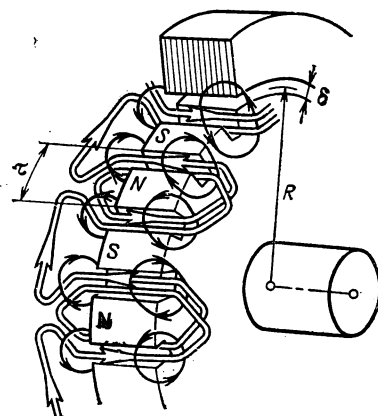


Рис. 23.1. Цилиндрическая (барабанная) разноименнополюсная обмотка

водниках на поверхности сердечника, обращенной к зазору. При таком чередовании направлений токов образуется периодически изменяющееся в пространстве поле (поверхность сердечника намагничивается «разноименнополюсно» — при перемещении по окружности за северным полюсом следует южный, за южным — северный и т. д.).

Тороидальная разноименнополюсная обмотка. Тороидальная обмотка (рис. 23.2) отличается от цилиндрической только тем, что соединения между ее проводниками с токами одного направления охватывают тороид сердечника. С точки зрения образования поля в зазоре эта обмотка при одинаковой структуре проводников на поверхности, обращенной к зазору, ничем не отличается от цилиндрической обмотки. Она также образует периодическое

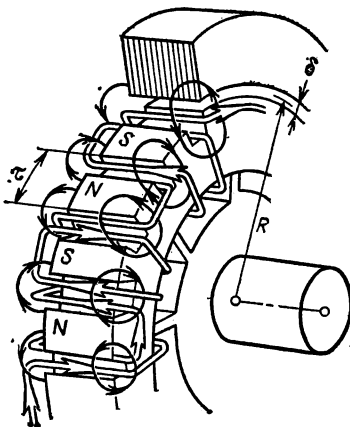


Рис. 23.2. Тороидальная разноименнополюсная обмотка

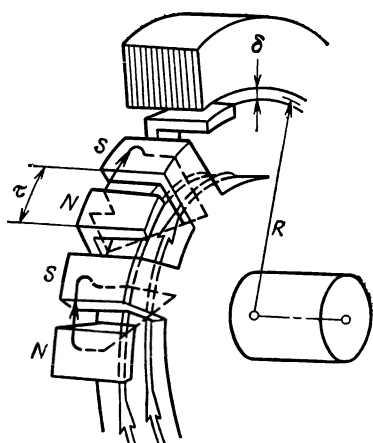


Рис. 23.3. Кольцеобразная обмотка и когтеобразный сердечник

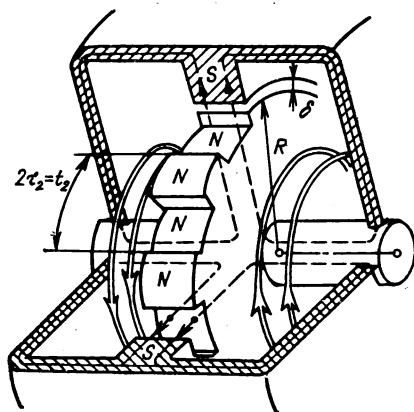


Рис. 23.4. Кольцеобразная одноименнополюсная обмотка и зубчатый сердечник

ки изменяющееся в пространстве поле и имеет те же разновидности, что и цилиндрическая обмотка (тороидальная обмотка имеет некоторые технологические преимущества в малых электрических машинах).

Кольцеобразная обмотка и когтеобразный сердечник (рис. 23.3). Периодичность поля в зазоре достигается за счет чередования направлений, в которых когтеобразные зубцы сердечника охватывают кольцеобразную обмотку с током. В отношении образования периодического поля это исполнение равноценно предыдущим. Недостатком конструкции является повышенное магнитное рассеяние между когтеобразными полюсами. Достоинство конструкции — простота изготовления обмотки. Область применения конструкции — малые электрические машины, а также машины средней мощности в особых исполнениях.

Кольцеобразная одноименнополюсная (униполярная) обмотка и зубчатый сердечник (рис. 23.4). Кольцеобразная обмотка, катушки которой охватывают вал машины, образует в зазоре одноименнополюсное (униполярное) поле. Поверхность внешнего сердеч-

ника имеет одну полярность, а наружного — другую.

Периодическое изменение индукции поля в зазоре достигается за счет зубчатости поверхности сердечника, обращенной к зазору.

Преимуществом этого исполнения является возможность получения значительно большего числа периодов поля, чем при других исполнениях, поскольку уменьшение размеров пазов не лимитируется необходимостью размещения в них проводников обмотки.

23.6. ВОЗМОЖНЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ПРИНЦИПУ ДЕЙСТВИЯ

Известны три принципиальных исполнения электрической машины, при которых индуктивности ее обмоток зависят от углового положения ротора и изменяются периодически во времени при вращении ротора:

- 1) машина с одной обмоткой на статоре и одной обмоткой на роторе;
- 2) машина с одной обмоткой на статоре и с зубчатым сердечником ротора;
- 3) машина с двумя обмотками на статоре и с зубчатым сердечником ротора.

Каждое из этих исполнений имеет дополнительные модификации.

В зависимости от формы поверхности, обращенной в сторону зазора, различают две качественно различающиеся конструкции сердечников: зубчатые и гладкие. Зубчатыми называют сердечники с сильно выраженной зубчатостью, пазы которых имеют относительно большое открытие в сторону зазора. Для этих сердечников характерно существенное влияние открытий, а иногда и формы пазов на магнитную проводимость зазора. С целью получения необходимой формы магнитного поля зубцам придается особая форма.

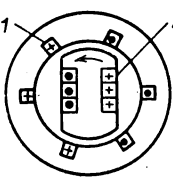
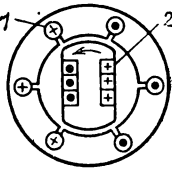
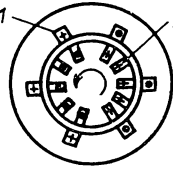
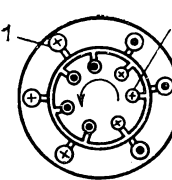
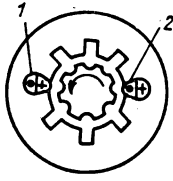
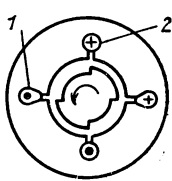
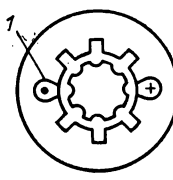
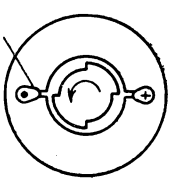
Гладкими называются сердечники со слабо выраженной зубчатостью, пазы которых имеют небольшое (по сравнению с зазором) открытие, а зазор между поверхностью зубца и другим сердечником постоянен.

Зубчатыми выполняются сердечники электрических машин, преобразование энергии в которых связано с периодическими изменениями проводимости зазора. В ряде случаев зубчатые сердечники со специально подобранными размерами зубцов используются для получения желательной формы поля в зазоре (явнополюсные роторы синхронных машин и статоры машин постоянного тока).

Кроме того, свойства зубчатых приобретают сердечники, пазы которых для удобства укладки обмотки делают открытыми. Применение открытых пазов вместо полузакрытых с малым открытием приводит к увеличению добавочных пульсационных потерь и оправдывается только технологическими соображениями.

Модификации принципиальных исполнений электрических машин (для разноименнополюсных обмоток), охватывающие возможные сочетания обмоток и сердечников статора и ротора, представлены в табл. 23.2.

Таблица 23.2

Обмотка 2			Обмотка 1, расположенная на статоре, разноименнополюсная	
			A	Сердечник статора зубчатый
Разноименнополюсная на роторе	1	Сердечник ротора зубчатый		
	2	Сердечник ротора гладкий		
Разноименнополюсная на статоре	3	Сердечник ротора зубчатый		
	4	Сердечник ротора гладкий	Электрохимическое преобразование невозможно	
Отсутствует	5	Сердечник ротора зубчатый		
	6	Сердечник ротора гладкий	Электрохимическое преобразование невозможно	

Примечание. Обмотка 1 может быть однофазной или многофазной.

В таблицу включены модификации двух возможных конструкций сердечников — зубчатых и гладких.

Исполнение машины с одной обмоткой на статоре и одной обмоткой на роторе применяется наиболее часто. При этом чаще всего используется модификация с однофазными или многофазными разноименнополюсными обмотками, выполненными с одинаковым числом периодов поля. Именно таким образом устроены наиболее распространенные машины переменного тока: асинхронные машины и синхронные машины в обычном исполнении.

Электрические машины можно разделить на явнополюсные и неявнополюсные. В машинах с неявно выраженными по-

люсами воздушный зазор равномерный и магнитные сопротивления во всех направлениях одинаковые. В явнополюсных машинах имеются четко выраженные продольные и поперечные оси с различными воздушными зазорами и магнитными сопротивлениями.

Асинхронные машины и высокоскоростные синхронные машины выполняются с неявно выраженными полюсами. Многополюсные синхронные машины имеют явно выраженную магнитную систему на роторе. Магнитная система с явно выраженными полюсами на статоре характерна для машин постоянного тока. Явно выраженная конструкция полюсов на статоре и роторе принадлежит индукторным или параметрическим машинам, в кото-



Рис. 23.5. Классификация электрических машин

рых преобразование энергии осуществляется за счет периодического изменения магнитного сопротивления воздушного зазора.

К машинам переменного тока относятся также коллекторные двигатели.

В коллекторных двигателях переменного тока к обмотке якоря через преобразователь частоты — коллектор — подводится напряжение изменяющейся частоты.

Коллектор преобразует переменный ток постоянной частоты в переменный ток регулируемой частоты. К обмоткам статора подводится переменный ток.

В машинах постоянного тока механический преобразователь частоты — коллектор — может быть заменен на коммутатор на полупроводниковых приборах (вентильные машины). В вентильных машинах обмотка возбуждения обычно располагается на роторе. Обмотка переменного тока выполняется на статоре и имеет обычно три-четыре фазы, подключенные к коммутатору.

Электрические машины можно классифицировать по различным признакам. На рис. 23.5 представлена классификация электрических машин по роду тока, принципу действия и типу возбуждения.

Описания конструкции и принципа действия наиболее распространенных типов машин приводятся ниже в соответствующих разделах.

23.7. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО КОНСТРУКТИВНОМУ ИСПОЛНЕНИЮ, СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ И СПОСОБУ ОХЛАЖДЕНИЯ

Согласно ГОСТ 2479-79 электрические машины классифицируются по конструктивному исполнению и способу монтажа, условное обозначение которых состоит из буквенной

части ИМ и следующих за ней четырех цифр. Первая цифра является номером группы, в которую входит машина по конструктивному исполнению.

Деление на группы представлено в табл. 23.3.

В каждой из девяти групп машины подразделяются в зависимости от способа монтажа (2-я и 3-я цифры в условном обозначении). Количество и исполнение концов вала обозначаются с помощью четвертой цифры.

Пример условного обозначения электрической машины с двумя подшипниковыми щитами, на лапах, с горизонтальным валом и одним цилиндрическим концом вала: ИМ1001 ГОСТ 2479-79.

Наиболее распространенные по конструктивному исполнению и способу монтажа виды электрических машин схематически изображены на рис. 23.6.

По степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и движущимися

Таблица 23.3. Группы конструктивных исполнений электрических машин

Условное обозначение группы	Конструктивное исполнение машин
ИМ1	Машины на лапах с подшипниковыми щитами
ИМ2	Машины на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах)
ИМ3	Машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите
ИМ4	Машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине
ИМ5	Машины без подшипников
ИМ6	Машины с подшипниковыми щитами и стоячковыми подшипниками
ИМ7	Машины со стоячковыми подшипниками (без подшипниковых щитов)
ИМ8	Машины с вертикальным валом, не охватываемые группами от ИМ1 до ИМ4
ИМ9	Машины специального исполнения по способу монтажа

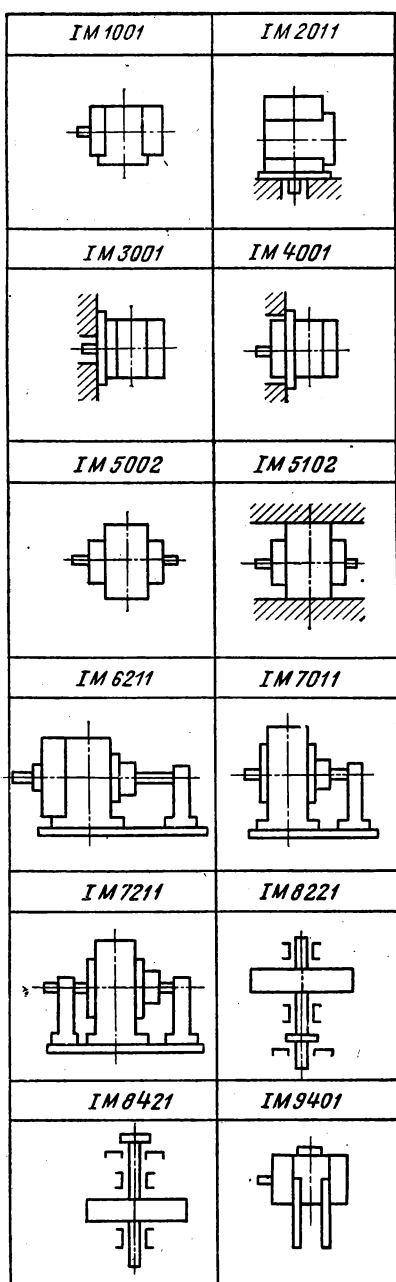


Рис. 23.6. Формы исполнения электрических машин

частями, находящимися внутри машины, и попадания посторонних тел внутрь машины, а также степени защиты от проникновения воды внутрь машины согласно ГОСТ 17494-72, распространяющемуся на машины электрические до 1000 В (кроме машин для работы во взрывоопасной среде и в особых климатических условиях — тропических, при воздействии влажности, инея, химических реагентов, плесневых грибов и т.п.), имеются следующие исполнения (их характеристика и расшифровка

обозначений даны в ГОСТ 14254-80:

1. Открытая электрическая машина (IP00).
2. Защищенная от прикосновения и попадания посторонних предметов машина (IP10, IP20).

3. Каплезащищенная машина: защищенная от капель воды (IP01); защищенная от капель воды и от прикосновения и попадания посторонних предметов (IP11, IP21, IP12, IP22, IP13; IP23, IP43).

4. Брызгозащищенная машина: защищенная от брызг, прикосновения и попадания посторонних предметов (IP44, IP54).

5. Машина, защищенная от водяных струй, прикосновения, попадания посторонних предметов и вредных отложений пыли (IP55).

6. Машина, защищенная от захлестывания морской волной на палубе корабля, прикосновения, попадания посторонних предметов и вредных отложений пыли (IP56).

7. Машина, защищенная от проникновения воды внутрь при кратковременном погружении в воду (IP57).

8. Машина, защищенная от проникновения воды внутрь при неограниченно длительном погружении в воду (IP58).

Кроме того, выпускаются машины, предназначенные для работы во взрывоопасной среде и в особых климатических условиях:

9. Взрывозащищенная машина, предназначенная для работы во взрывоопасной среде и устроенная таким образом, что при взрыве газов внутри машины возникающее пламя не может проникнуть в окружающую среду.

10. Влагостойкая электрическая машина — для работы при большой влажности.

11. Морозостойкая электрическая машина — для работы при возможном образовании инея.

12. Химостойкая машина — для работы при воздействии химических реагентов.

13. Тропическая электрическая машина — для работы при возможном образовании плесневых грибов.

По способу охлаждения электрические машины могут быть классифицированы по нескольким признакам.

1. В зависимости от наличия или отсутствия вентилятора различают:

1) машины с естественным охлаждением, не имеющие специальных вентиляторов (циркуляция охлаждающего воздуха осуществляется за счет вентилирующего действия вращающихся частей машины и явления конвекции). Этот тип охлаждения применяется обычно в открытых машинах;

2) машины с искусственным охлаждением за счет вытяжной (рис. 23.7, е) или нагнетательной (рис. 23.7, а, б, г, д) вентиляции, в которых движение охлаждающего нагретые части газа (обычно воздуха) или жидкости обеспечивается специальным вентилятором. Машины с искусственным охлаждением могут быть подразделены на следующие группы:

а) машины с самовентиляцией, имеющие вентилятор на валу (защищенные или закрытые — рис. 23.7, а—г, ж);

б) машины с независимой вентиляцией, вентилятор которых приводится во вращение посторонним двигателем (обычно закрытые — рис. 23.7, д, е).

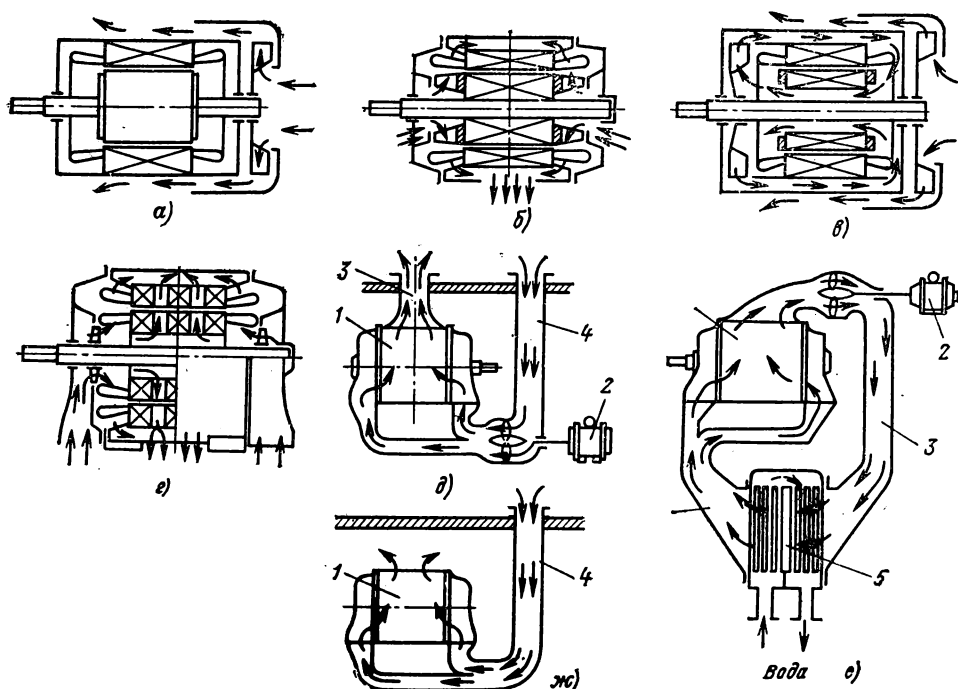


Рис. 23.7. Конструктивные схемы электрических машин с различными способами охлаждения:
1 — охлаждаемая машина; 2 — двигатель независимого вентилятора; 3 — трубопровод для нагретого воздуха (газа); 4 — трубопровод для холодного воздуха (газа); 5 — газоохладитель, охлаждаемый водой

II. В зависимости от того, какие части в машинах с искусственным охлаждением обдуваются воздухом, различают:

1) обдуваемые машины (рис. 23.7, а) — закрытые машины, в которых осуществляется принудительное охлаждение только внешней наружной поверхности машины, иногда специально развитой при помощи выступающих ребер (малые машины);

2) продуваемые машины (рис. 23.7, б, г—ж) — защищенные или закрытые машины, в которые воздух попадает извне, омывает нагретые поверхности активных частей (обмоток и магнитопровода) и затем выбрасывается наружу (средние и крупные машины).

В обдуваемых закрытых машинах обычно при помощи встроенных вентиляторов усиливают циркуляцию воздуха внутри машины для интенсификации переноса тепла от активных частей, в которых выделяются потери, к частям, наружная поверхность которых охлаждается внешним обдувом (закрытые машины средней мощности для работы в пыльных помещениях, рис. 23.7, в).

III. В зависимости от направления движения охлаждающей среды относительно активных частей в машинах с внутренней вентиляцией различают:

1) машины с аксиальной вентиляцией (рис. 23.7, в);

2) машины с аксиально-радиальной вентиляцией (рис. 23.7, г);

3) машины с радиальной вентиляцией (рис. 23.7, б).

IV. В зависимости от способа охлаждения нагретого в машине газа (обычно воздуха) различают:

1) машины с разомкнутой системой вентиляции — защищенные или закрытые машины, в которых охлаждающий газ засасывается из окружающего помещения или снаружи и выбрасывается в окружающее помещение или наружу.

Для машин малой и средней мощности, работающих в просторных помещениях с чистым воздухом, источником и местом выброса охлаждающего воздуха является помещение, в котором установлена машина (рис. 23.7, б, е).

Забор воздуха снаружи (из атмосферы) по трубопроводу и выброс его в окружающее помещение применяются в закрытых машинах, работающих в помещениях с загрязненным воздухом (рис. 23.7, ж).

Забор воздуха из окружающего помещения и выброс наружу по трубопроводу применяются в мощных машинах во избежание чрезмерного нагрева помещения.

Забор воздуха снаружи (из атмосферы) по трубопроводу и выброс его наружу по трубопроводу применяются в крупных машинах (например, гидрогенераторах), установленных в местностях с чистым воздухом, во избежание чрезмерного нагрева воздуха в помещении и движения его с большой скоростью (рис. 23.7, д);

2) машины с замкнутой системой вентиляции — закрытые машины, в которых цирку-

лирует постоянный объем воздуха или другого газа, например водорода, охлаждаемого в газоохладителе водой (рис. 23.7, е). Газоохладитель иногда встраивается в машину.

V. В зависимости от того, какое вещество применено в качестве охлаждающей среды, различают машины с воздушным, водородным, масляным, водяным охлаждением. В одной машине может быть применено одновременно несколько охлаждающих веществ (например, водородное охлаждение ротора и масляное охлаждение статора турбогенератора).

Если охлаждение обеспечивается за счет испарения жидкости, то система охлаждения называется испарительной.

VI. В зависимости от способа охлаждения обмоток различают:

1) косвенное охлаждение, при котором охлаждающий газ или жидкость непосредственно не соприкасается с медью обмотки;

2) непосредственное охлаждение, при котором охлаждающий газ или жидкость либо соприкасается с медью обмотки, либо протекает по специальным охлаждающим каналам, выполненным в виде встроенных в обмотку тонкостенных трубок из немагнитного материала, покрытых тонким слоем изоляции. Система непосредственного охлаждения применяется в высокоиспользованных электрических машинах большой мощности (например, крупные турбо- и гидрогенераторы, особо мощные и уникальные асинхронные короткозамкнутые двигатели).

23.8. ОБЩИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ (ПО ГОСТ 183-74 И ГОСТ 17154-71)

1. Общие технические требования, предъявляемые к вращающимся электрическим машинам переменного и постоянного тока без ограничения мощности, напряжения и частоты, сформулированы в ГОСТ 183-74.

Стандарт распространяется только на электрические машины общего назначения. Электрические машины должны изготавливаться в соответствии с требованиями этого стандарта и стандартов или технических условий на отдельные виды электрических машин.

2. Номинальный режим — режим работы, для которого машина предназначена предприятием-изготовителем.

3. Номинальные данные электрической машины, характеризующие номинальный режим ее работы, относятся к работе машины на высоте до 1000 м над уровнем моря и при температуре газообразной охлаждающей среды до $+40^{\circ}\text{C}$ и охлаждающей воды до $+30^{\circ}\text{C}$ (в стандартах и технических условиях может быть установлена другая температура охлаждающей воды, но не более $+33^{\circ}\text{C}$).

4. Номинальные режимы работы электрических машин должны соответствовать одному из следующих основных режимов:

а) *Продолжительный режим* (условное обозначение режима S1), при котором электрическая машина работает при постоянной нагрузке, продолжительностью не менее, чем необходимо для достижения установившейся температуры всех частей машины, при неиз-

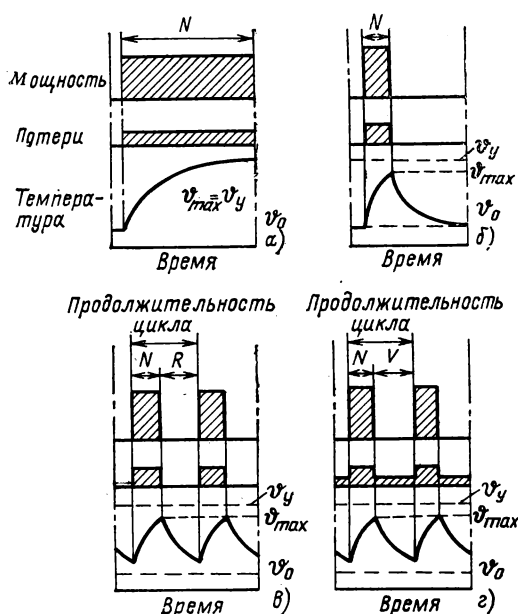


Рис. 23.8. Основные номинальные режимы работы электрических машин: $\phi_{\text{у}}$ — установившаяся температура; ϕ_0 — температура охлаждающей среды; ϕ_{max} — максимальная температура

менной температуре охлаждающей среды (рис. 23.8, а).

б) *Кратковременный режим* (S2) с длительностью периода неизменной номинальной нагрузки 10, 30, 60 и 90 мин — режим работы, при котором работа с постоянной нагрузкой, продолжительностью менее, чем необходимо для достижения установившейся температуры при неизменной температуре среды, чередуется с отключениями машины, во время которых она охлаждается до температуры окружающей среды (рис. 23.8, б).

в) *Повторно-кратковременный режим* (S3) с продолжительностью включения (ПВ) 15, 25, 40 и 60 % (продолжительность одного цикла, если нет других указаний, принимают равной 10 мин) — режим работы электрической машины, при котором кратковременная неизменная нагрузка чередуется с отключениями машины, причем во время нагрузки температура машины не достигает установившегося значения, а во время паузы машина не успевает охладиться до температуры окружающей среды.

Повторно-кратковременный номинальный режим работы характеризуется относительной (в процентах) продолжительностью включения (ПВ), определяемой по формуле

$$\text{ПВ} = \frac{N}{N + R} \cdot 100,$$

где N — время работы; R — пауза. Пусковые потери практически не оказывают влияния на превышения температуры отдельных частей машины (рис. 23.8, в).

г) *Переключающийся режим* (S6) с продолжительностью нагрузки (ПН) 15, 25, 40 и 60 % (продолжительность одного цикла, если

нет других указаний, принимают равной 10 мин) — режим работы электрической машины, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами холостого хода (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы температуры отдельных частей электрической машины при неизменной температуре окружающей среды могли достигнуть установившихся значений (рис. 23.8, з).

Переменяющийся номинальный режим работы характеризуется относительной (в процентах) продолжительностью нагрузки (ПН), определяемой по формуле

$$\text{ПН} = \frac{N}{N + V} 100,$$

где N — время работы; V — время холостого хода.

Помимо основных номинальных режимов работы S1, S2, S3 и S6 в качестве дополнительных (рекомендуемых) установлены режимы:

а) повторно-кратковременный с частыми пусками (S4) с ПВ=15, 25, 40 и 60 %;

б) повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением (S5) с ПВ=15, 25, 40 и 60 %;

в) переменяющийся с частыми реверсами при электрическом торможении (S7);

г) переменяющийся с двумя или более частотами вращения (S8).

В дополнительных номинальных режимах устанавливаются число включений в час (режимы S4 и S5), число реверсов в час (режим S7), число циклов в час (режим S8) (если в стандартах или технических условиях не установлено иное) 30, 60, 120, 240 при коэффициенте инерции (см. п. 27) 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0.

5. Номинальная мощность электрической машины:

а) для генераторов постоянного тока — полезная мощность на выводах машины;

б) для генераторов переменного тока — полная электрическая мощность при номинальном коэффициенте мощности;

в) для электродвигателей — полезная механическая мощность на валу;

г) для синхронных и асинхронных компенсаторов — реактивная мощность на выводах компенсатора.

Номинальная мощность генераторов постоянного тока и электродвигателей выражается в Вт, кВт, генераторов переменного тока и компенсаторов — в В·А, кВт·А или МВ·А. Номинальная мощность указывается на заводском щитке электрической машины.

6. Номинальное напряжение электрической машины — напряжение, соответствующее ее номинальному режиму работы.

Номинальное напряжение трехфазной электрической машины — ее междофазное (линейное) напряжение.

Номинальное напряжение ротора асинхронной машины с фазным ротором — напряжение разомкнутой роторной обмотки (вторичной цепи) между контактными кольцами при неподвижном роторе и при статорной обмотке (первичной цепи), включенной на номинальное напряжение.

При двухфазной обмотке ротора за его номинальное напряжение принимают наибольшее из напряжений между контактными кольцами.

Номинальное напряжение системы возбуждения электрической машины с независимым возбуждением — номинальное напряжение того независимого источника, от которого получается возбуждение.

7. Номинальное напряжение возбуждения электрической машины — напряжение на выводах или на контактных кольцах обмотки возбуждения при питании ее номинальным током возбуждения и сопротивлении обмотки постоянному току, которое должно быть приведено к расчетной рабочей температуре (см. п. 22).

8. Номинальный ток электрической машины — ток, соответствующий номинальному режиму работы электрической машины.

9. Номинальный ток возбуждения электрической машины — ток возбуждения, соответствующий номинальному режиму работы.

10. Номинальное изменение напряжения электрического генератора — изменение напряжения на выводах генератора (при работе отдельно от других генераторов) при изменении нагрузки от номинальной до нулевой и при сохранении номинальной частоты вращения, кроме того, для машин с независимым возбуждением — при сохранении номинального тока возбуждения, а для машин с самовозбуждением — при обмотке возбуждения, имеющей расчетную рабочую температуру (см. п. 22) и неизменное сопротивление цепи обмотки возбуждения. Изменение напряжения выражают в процентах или в долях номинального напряжения генератора.

11. Номинальная частота вращения электрической машины — частота вращения, соответствующая работе машины при номинальном напряжении, мощности или моменте и частоте тока.

12. Номинальное изменение частоты вращения электродвигателя — изменение его частоты вращения при номинальном напряжении на его выводах (в случае двигателя переменного тока, кроме того, при номинальной частоте тока) при следующих изменениях нагрузки:

а) для двигателей, допускающих нулевую нагрузку, — от номинальной нагрузки до нулевой;

б) для двигателей, не допускающих нулевой нагрузки, — от номинальной нагрузки до $1/4$ номинальной нагрузки.

Изменение частоты вращения выражают в процентах или в долях номинальной частоты вращения.

13. Нагрузка электрической машины — мощность, которую развивает электрическая машина в данный момент времени. Для обозначения нагрузки, равной номинальной мощности, применяют термин «номинальная нагрузка».

Нагрузка выражается в единицах мощности (полной или активной), либо в процентах, либо в долях номинальной мощности.

Нагрузка может быть задана током, потребляемым или отдаваемым электрической машиной, и выражена в амперах, процентах или в долях номинального тока.

14. Практически неизменной нагрузкой электрической машины считается такая нагрузка, при которой отклонения тока и напряжения якоря и мощности машины от значений, соответствующих заданному режиму работы, составляют не более $\pm 3\%$, тока возбуждения и частоты — не более $\pm 1\%$.

15. Перегрузкой называется превышение фактической нагрузки электрической машины над ее номинальной нагрузкой. Перегрузку выражают в процентах или долях номинальной нагрузки.

16. Коэффициентом полезного действия (КПД) называется отношение полезной (отдаваемой) активной мощности электрической машины к затрачиваемой (подводимой) активной мощности.

17. Практически симметричной трехфазной системой напряжений называется такая трехфазная система напряжений, для которой напряжение обратной последовательности не превышает 1% напряжения прямой последовательности при разложении данной трехфазной системы напряжений на системы прямой и обратной последовательностей.

18. Практически симметричной трехфазной системой токов называется такая трехфазная система токов, для которой ток обратной последовательности не превышает 5% тока прямой последовательности.

19. Практически синусоидальным напряжением называется такое напряжение, у которого коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (см. п. 20) не превышает 5% .

20. Коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения (или тока) называется выраженное в процентах отношение корня квадратного из суммы квадратов амплитуд высших гармонических составляющих данной периодической кривой к амплитуде ее основной гармонической.

21. Рабочей температурой отдельной части электрической машины называется практически установившаяся температура этой части, соответствующая номинальному режиму работы при неизменной температуре окружающей среды.

22. Расчетной рабочей температурой называется температура, к которой приводят сопротивления обмоток электрической машины при подсчете потерь в них. Расчетная рабочая температура устанавливается равной 75°C для обмоток, принятые предельные допускарные превышения температуры изоляции которых соответствуют классам нагревостойкости А, Е и В, 115°C для обмоток, принятые предельные допускарные превышения температуры изоляции которых соответствуют классам нагревостойкости F и H.

23. Практически холодным состоянием электрической машины называется состояние, при котором температура любой части электрической машины отличается от температуры окружающей среды не более чем на $\pm 3^\circ\text{C}$.

24. Превышением температуры отдельной части электрической машины называется разность между температурой этой части и температурой окружающей среды.

25. Практически установившейся температурой отдельной части электрической машины называется температура, изменение которой в

течение 1 ч не превышает 1°C при условии, что нагрузка машины и температура охлаждающей среды остаются практически неизменными.

26. Правым направлением вращения электрической машины с односторонним приводом считается вращение по часовой стрелке, если смотреть на электрическую машину со стороны присоединения ее к первичному двигателю или к рабочему механизму.

27. Коэффициентом инерции называется отношение суммы приведенного к валу двигателя момента инерции приводимого механизма и момента инерции ротора (якоря) двигателя к моменту инерции ротора (якоря) двигателя. Условное обозначение коэффициента инерции F_I .

28. Начальным пусковым током машины переменного тока называется установившееся значение тока при неподвижном роторе, номинальном подведенном напряжении, номинальной частоте и соединении обмоток, соответствующем номинальному режиму работы машины.

29. Начальным пусковым вращающим моментом машины переменного тока называется момент вращения, развиваемый машиной при неподвижном роторе, установившемся токе, номинальном подведенном напряжении, номинальной частоте и соединении обмоток, соответствующем номинальному режиму работы машины.

30. Минимальным вращающим моментом асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в процессе пуска в ход называется наименьший момент вращения, развиваемый в процессе разгона двигателя от неподвижного состояния до скорости, соответствующей максимальному моменту, при номинальном напряжении, номинальной частоте и при соединении обмоток, соответствующем номинальному режиму работы двигателя (или пусковому режиму для однофазных двигателей с пусковой схемой).

31. Максимальным вращающим моментом двигателя переменного тока называется наибольший момент вращения, развиваемый двигателем в установившемся режиме, при номинальном напряжении, номинальной частоте и соединении обмоток, соответствующем номинальному режиму работы двигателя, а для синхронного двигателя — и при номинальном токе возбуждения.

23.9. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ (ПО ГОСТ 183-74)

1. Номинальные мощности всех видов электрических машин постоянного и переменного тока мощностью до $10\,000\text{ кВт}$ должны соответствовать ГОСТ 12139-84.

2. Номинальные напряжения электрических машин должны соответствовать ГОСТ 721-77.

3. Допускаемая нагрузка трехфазных генераторов и синхронных компенсаторов при несимметрии токов в фазах и продолжительной работе устанавливается такой, чтобы токи в фазах не превышали номинального зна-

чения, а разность токов в фазах составляла:
а) для гидрогенераторов — по ГОСТ 5616-81; для турбогенераторов — по ГОСТ 533-76;

б) для всех других генераторов и синхронных компенсаторов с явно выраженными полюсами — не более 20 % номинального тока фазы.

4. *Допускаемые отклонения напряжения от номинального значения.* Генераторы постоянного тока и синхронные компенсаторы при номинальной частоте вращения, а генераторы переменного тока, кроме того, и при номинальном коэффициенте мощности должны развивать номинальную мощность при отклонениях напряжения от номинального на $\pm 5\%$. Генераторы и синхронные компенсаторы при повышении напряжения до 110 % номинального должны допускать продолжительную работу с мощностью, указанной заводом-изготовителем.

5. *Допускаемое искажение синусоидальности кривой линейного напряжения генераторов переменного тока.* Коэффициент искажения синусоидальности кривой линейного напряжения (см. § 23.8, п. 20) при холостом ходе и номинальном напряжении для трехфазных генераторов переменного тока 50 Гц должен быть:

для генераторов мощностью свыше 100 кВ·А — не более 5 %;

для генераторов мощностью от 10 до 100 кВ·А — не более 10 %.

Для других генераторов (однофазные, другая частота) коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения указывается в стандартах или технических условиях на эти генераторы.

При соединении обмотки статора генератора в треугольник при номинальной мощности ток третьей гармонической не должен превышать 20 % номинального тока генератора.

6. *Кратковременная перегрузка по току.* Электрические машины должны без повреж-

дений и остаточных деформаций выдерживать в нагретом состоянии следующие перегрузки:

а) машины постоянного тока (кроме возбуждателей с отношением предельного напряжения к номинальному напряжению возбуждения более 1,6) и коллекторные машины переменного тока — перегрузку по току на 50 % в течение 1 мин;

б) возбуждители с отношением предельного напряжения к номинальному напряжению более 1,6 — перегрузку по току на 100 % (номинального тока возбуждения возбуждаемой машины) в течение 1 мин;

в) бесколлекторные машины переменного тока мощностью 0,55 кВт и выше, кроме машин с непосредственным охлаждением, — перегрузку по току на 50 % в течение 2 мин;

г) бесколлекторные машины переменного тока с непосредственным охлаждением обмоток — перегрузку по току на 50 % в течение 1 мин.

7. *Повышенная частота вращения.* Все электрические машины должны без повреждений и остаточных деформаций выдерживать в течение 2 мин следующее повышение частоты вращения:

а) электродвигатели с последовательным возбуждением постоянного и переменного тока — на 20 % сверх наибольшей, указанной на шитке электродвигателя, но не менее чем на 50 % номинальной;

б) электродвигатели с регулируемой частоты вращения — на 20 % сверх наибольшей, указанной на шитке электродвигателя;

в) гидрогенераторы (согласно ГОСТ 5616-81) — на 75 % сверх номинальной, но не более угонной. Эта частота вращения не должна быть менее частоты вращения, достигаемой агрегатом при полном сбросе нагрузки и при исправной системе регулирования, плюс 15 % номинальной частоты вращения;

г) все остальные электрические машины — на 20 % сверх номинальной.

8. *Степень искрения электрических машин.* Искрение на коллекторе оценивается по сте-

Т а б л и ц а 23.4. Степени искрения электрических машин

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
1 ^{1/4}	Слабое искрение под небольшой частью края щетки	
1 ^{1/2}	Слабое искрение под большей частью края щетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузках	Появление следов почернения на коллекторе, не устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и частичное разрушение щеток

пени искрения под сбегающим краем щетки по шкале, указанной в табл. 23.4. Степень искрения указывается в стандартах или технических условиях на отдельные виды машин.

Состояние коллектора и щеток проверяют по истечении определенного времени работы, которое регламентируется ГОСТ 183-74 в зависимости от режима работы машины.

9. *Допускаемые шумы, вибрации и индустриальные радиопомехи*, создаваемые электрическими машинами, должны соответствовать нормам, оговариваемым в стандартах (см. § 23.20) или технических условиях.

10. *Допускаемые отклонения от номинальных значений показателей*, установленных в соответствующих стандартах или технических условиях, регламентируются ГОСТ 183-74.

23.10. ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ПРЕВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ (ПО ГОСТ 183-74)

1. *Предельно допустимые превышения температуры частей электрических машин должны соответствовать:*

в машинах, предназначенных для продолжительных, повторно-кратковременных и перемежающихся номинальных режимов работы, — значениям, указанным в п. 2 и 3;

в машинах, предназначенных для кратковременного номинального режима работы (к концу рабочего периода), а также в электрических машинах с ограниченным сроком службы — указаниям стандартов или технических условий на эти машины. Для электрических машин, предназначенных для кратковременного номинального режима работы, для которых нет таких указаний, допустимые превышения температуры могут быть выше значений, указанных в табл. 23.5, на 10°C .

2. *Предельно допустимые превышения температуры частей электрических машин при температуре газообразной охлаждающей среды $+40^{\circ}\text{C}$ и высоте над уровнем моря не более 1000 м, если они не указаны в стандартах на отдельные виды машин, должны соответствовать значениям, указанным в табл. 23.5.*

3. *Предельно допустимые превышения температуры частей электрических машин при температуре газообразной охлаждающей среды, отличающейся от 40°C , и на высоте над уровнем моря более 1000 м должны быть следующими:*

а) при температуре газообразной охлаждающей среды выше 40°C (но не более 60°C) предельно допустимые превышения температуры, указанные в табл. 23.5, уменьшаются для всех классов изоляционных материалов на разность между температурой охлаждающей среды и температурой 40°C ; при температуре охлаждающей среды выше 60°C допустимые превышения температуры устанавливаются по согласованию с предприятием-изготовителем;

б) при температуре газообразной охлаждающей среды меньше 40°C предельно допу-

стимые превышения температуры, указанные в табл. 23.5, для всех классов изоляционных материалов могут быть увеличены на разность между температурой охлаждающей среды и температурой 40°C , но не более чем на 10°C для всех электрических машин, за исключением турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, для которых эти величины указываются в соответствующих стандартах;

в) предельно допустимые превышения температуры электрических машин, предназначенных для установки на высоте над уровнем моря более 1000 м (но не превышающей 4000 м), при измерении на высоте до 1000 м уменьшаются для изоляционных материалов всех классов на 1 % на каждые 100 м сверх 1000 м и при условии, что температура охлаждающей среды не выше 40°C .

Номинальные данные электрических машин могут быть сохранены, если превышению высоты места установки машин сверх 1000 м над уровнем моря будет соответствовать снижение температуры газообразной охлаждающей среды по сравнению с 40°C . При этом каждым 100 м превышения высоты места установки машины над высотой 1000 м должно соответствовать снижению температуры газообразной охлаждающей среды не менее чем на 1 % предельно допустимых превышений температуры, указанных в табл. 23.5.

Примечание. Если абсолютное давление в охлаждающей системе машины поддерживается постоянным независимо от высоты установки машины над уровнем моря, то не следует вводить поправку в допускаемые превышения температуры в связи с изменением высоты установки электрической машины над уровнем моря.

4. *Предельно допустимая температура для какой-либо части электрической машины определяется суммой превышения температуры, взятой из табл. 23.5, и 40°C .*

5. *Предельно допустимая температура подшипников не должна превышать следующих значений:*

для подшипников скольжения 80°C (температура масла при этом не должна быть более 65°C);

для подшипников качения 100°C .

Более высокая температура допускается, если применены специальные подшипники качения или специальные сорта масел.

6. *Охладители электрических машин.* Водяные охладители электрических машин должны обеспечить разность между температурой газообразной охлаждающей среды, выходящей из охладителя, и температурой воды, поступающей в охладитель, не превышающую 10°C , а для машин, температура охлаждающей воды которых принята $+33^{\circ}\text{C}$, — не превышающую 7°C . Температура охлаждающей воды при этом не должна превышать соответственно $+30$ и $+33^{\circ}\text{C}$.

Примечание. В тех случаях, когда вода или иная жидкость применяется для непосредственного охлаждения электрических машин или их частей, предельная температура охлаждающей жидкости регламентируется стандартами или техническими условиями на эти машины.

23.11. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН (ПО ГОСТ 183-74)

1. *Электрическая прочность изоляции обмоток.* Каждая электрическая машина должна выдерживать без повреждения изоляции:

а) испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками (п. 2);

б) испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток (п. 3).

Если электрическую машину испытывают на нагревание, то испытание на электрическую прочность изоляции проводят непосредственно вслед за испытанием на нагревание.

2. *Электрическая прочность изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками.* Изоляция обмоток относительно корпуса машины и между обмотками должна выдерживать в течение 1 мин испытательное напряжение при частоте 50 Гц, практически синусоидальное, указанное в табл. 23.6.

Все электрические машины на месте установки должны выдерживать в течение 1 мин в собранном виде (после их установки перед сдачей в эксплуатацию) испытание изоляции напряжением, равным 80 % испытательного напряжения, указанного в табл. 23.6. Это испытание является обязательным для турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов.

3. *Электрическая прочность междувитковой изоляции обмоток.* Изоляция обмотки между смежными ее витками должна выдерживать в течение 3 мин испытание повышенным напряжением. Это испытание производится при холостом ходе электрической машины путем повышения подводимого (при испытании в режиме электродвигателя) или генерируемого (при испытании в режиме генератора) напряжения на 30 % сверх номинального.

Особые требования предъявляются к испытанию электрической прочности междувитковой изоляции обмоток гидрогенераторов, электрических машин постоянного тока с числом полюсов более четырех, синхронных ма-

Т а б л и ц а 23.6. Электрическая прочность изоляции обмоток

Электрическая машина или ее часть	Испытательное напряжение
1. Машины мощностью до 1 кВт (или 1 кВ·А) с $U_{\text{ном}} < 100$ В (за исключением указанных в п. 4—8)	500 В + $2U_{\text{ном}}$
2. Машины мощностью от 1 кВт (или 1 кВ·А) и выше с $U_{\text{ном}} < 100$ В (за исключением указанных в п. 4)	1000 В + $2U_{\text{ном}}$
3. Машины:	
а) мощностью до 1000 кВт (или 1000 кВ·А), за исключением перечисленных в п. 1, 2 и 4—8	1000 В + $2U_{\text{ном}}$
б) мощностью 1000 кВт (или 1000 кВ·А) и выше, за исключением указанных в п. 4—8, с $U_{\text{ном}}$:	
до 3300 В включительно	1000 В + $2U_{\text{ном}}$
от 3300 до 6600 В включительно	$2,5U_{\text{ном}}$
от 6600 до 17 000 В включительно	3000 В + $2U_{\text{ном}}$
свыше 17 000 В	По согласованию между изготовителем и потребителем
4. Обмотки возбуждения машин постоянного тока с независимым возбуждением	1000 В + $2U_{\text{ном}}$ $f_{\text{ном}}$, но не менее 1500 В
5. Обмотки возбуждения синхронных машин:	
а) генераторов, двигателей, компенсаторов, пускаемых специальными пусковыми двигателями	10 $U_{\text{ф ном}}$, но не менее 1500 В и не более 3500 В
б) машин, предназначенных для непосредственного пуска с обмоткой возбуждения, замкнутой на сопротивление, не превышающее десятикратное сопротивление обмотки возбуждения при постоянном токе, или на источник своего питания	10 $U_{\text{ф ном}}$, но не менее 1500 В и не более 3500 В
в) машин, предназначенных для пуска с обмоткой возбуждения, замкнутой на сопротивление, значение которого равно десятикратному сопротивлению обмотки или более него, или разомкнутой обмоткой возбуждения независимо от того, секционирована она или нет	1000 В плюс двукратное максимальное действующее значение напряжения, которое можно получить при данных пусковых условиях между выводами обмотки возбуждения (между выводами любой секции), но не менее 1500 В
6. Вторичные обмотки асинхронных двигателей, не находящиеся непрерывно в короткозамкнутом состоянии:	
а) для двигателей, допускающих торможение противовключением	1000 В плюс четырехкратное номинальное напряжение вторичной обмотки
б) для двигателей, не предназначенных для торможения противовключением	1000 В плюс двукратное номинальное напряжение вторичной обмотки
7. Возбудители (за исключением указанных ниже)	Как для обмоток, к которым присоединяются возбудители
Возбудители синхронных двигателей (к ним относятся и синхронизированные асинхронные двигатели), если во время пуска они заземлены или отключены от обмоток возбуждения. Обмотки возбуждения возбудителей с независимым возбуждением	1000 В плюс двукратное номинальное напряжение возбудителя, но не менее 1500 В
8. Собранные в группы электрические машины и аппараты	Если испытанию подвергается группа, собранная из электрических машин и аппаратов, из которых каждая электрическая машина и каждый аппарат проходили испытания на электрическую прочность, то испытательное напряжение не должно превышать 85 % испытательного напряжения той машины (или аппарата), у которой (которого) это напряжение наименьшее

шин, у которых при номинальном токе возбуждения напряжение холостого хода превышает номинальное напряжение машины более чем на 30 %, возбудителей, трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором (см. ГОСТ 183-74, п. 1.18).

4. Сопротивление изоляции обмоток электрической машины (r , МОм) относительно ее корпуса и сопротивление изоляции между обмотками при рабочей температуре машины должны устанавливаться в стандартах на конкретные виды машин.

Примечание. Методы измерения сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками и методы измерения сопротивлений обмоток устанавливаются ГОСТ 11828-75.

23.12. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Различают следующие виды потерь мощности в электрических машинах:

а) потери в стали, или магнитные потери P_m —потери от гистерезиса и вихревых токов, вызванные перемагничиванием сердечников;

б) механические потери P_T —потери на трение всех видов (потери на трение в подшипниках, на трение ротора о заполняющую машину среду, на трение щеток о коллектор и контактные кольца);

в) основные потери в цепях рабочих обмоток машины P_o —электрические потери в якорных обмотках машин постоянного и переменного тока и в короткозамкнутых обмотках асинхронных машин, а также в последовательно соединенных с ними обмотках. Согласно ГОСТ 25941-83 основные потери определяются по сопротивлению обмоток, приведенному к расчетной рабочей температуре (см. § 23.8, п. 22);

г) потери в переходных контактах щеток $P_{щ}$;

д) потери на возбуждение P_f , P_b ;

е) добавочные потери P_d —потери, не учтенные в п. «а» — «д».

Добавочные потери всех электрических машин (кроме синхронных мощностью свыше 100 кВт·А) могут быть определены приближенно пропорционально полезной мощности для генераторов и подводимой мощности для двигателей и составляют в процентах (при номинальной мощности электрической машины):

Для машин постоянного тока:		
некомпенсированных	1	Если другие значения не оговорены в стандартах или технических условиях на отдельные виды машин
компенсированных	0,5	
Для асинхронных машин	0,5	
Для синхронных машин мощностью до 100 кВт·А включительно	0,5	
Для коллекторных машин переменного тока	1	

При мощностях, отличающихся от номинальной, добавочные потери пересчитываются пропорционально квадрату тока нагрузки для всех видов машин.

Примечания: 1. Выше были указаны обозначения для отдельных видов потерь, принимаемые в разд. 23 и 24.

2. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия установлены ГОСТ 25941-83.

Коэффициент полезного действия (КПД) электрической машины равен отношению полезной (отдаваемой) активной мощности P_2 к подводимой активной мощности P_1 (см. § 23.8, п. 16):

$$\eta = P_2 / P_1.$$

При определении КПД по экспериментальным данным в связи с возможностью весьма точного измерения электрической мощности используются формулы:

для генераторов

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P};$$

для двигателей

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1},$$

где P_2 — полезная мощность, отдаваемая генератором; P_1 — мощность, подводимая к двигателю; ΣP — сумма потерь в машине.

23.13. ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЫВОДОВ ОБМОТОК (ПО ГОСТ 183-74)

Выводы обмоток электрических машин обозначаются в соответствии с табл. 23.7.

Таблица 23.7. Обозначения выводов обмоток

Наименование, схема соединения обмоток	Обозначения выводов	
	Начало	Конец
I. Обмотки машин постоянного тока		
Обмотка якоря	Я1	Я2
Компенсационная обмотка	К1	К2
Обмотка добавочных полюсов	Д1	Д2
Последовательная обмотка возбуждения	С1	С2
Параллельная обмотка возбуждения	Ш1	Ш2
Пусковая обмотка	П1	П2
Уравнительный провод и уравнительная обмотка	У1	У2
Обмотка особого назначения	О1; О3	О2; О4
Независимая обмотка возбуждения	Н1	Н2
II. Обмотки машин переменного тока		
А. Обмотки статора (якоря):		
открытая схема	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	С1 С2 С3
соединение звездой	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нулевая точка	С1 С2 С3 0
соединение треугольником	Первый вывод Второй вывод Третий вывод	С1 С2 С3
Б. Обмотки возбуждения (индукторов) синхронных машин		И1 И2
В. Обмотки ротора трехфазных асинхронных двигателей	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нулевая точка	Р1 Р2 Р3 0
Г. Обмотки статора (якоря) однофазных асинхронных двигателей	Главная обмотка Вспомогательная обмотка	С1 С2 В1 В2

Примечания: 1. Обозначение выводов обмоток электрических машин постоянного тока выполняют так, чтобы при правом направлении вращения (см. § 23.8, п. 26) в режиме электродвигателя ток во всех обмотках (за исключением размагничивающих обмоток на главных полюсах) протекал в направлении от начала 1 к концу 2.

2. Выводы асинхронных двигателей, имеющих секционированные обмотки, позволяющие изменять число полюсов, обозначают теми же буквами, что и выводы простых обмоток, но с дополнительными цифрами впереди прописных букв, указывающими на число полюсов данной секции.

3. Контактные кольца роторов асинхронных двигателей обозначают так же, как и присоединенные к ним выводы обмотки ротора. Обозначение самих колец буквами не обязательно.

4. Обозначения выводов наносят непосредственно на концах обмоток, на выводах или на щитке рядом с выводами. В малых машинах допускается применение обозначений концов разноцветными проводами (см. ГОСТ 183-74, п. 5.8).

23.14. НОМИНАЛЬНЫЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН (ПО ГОСТ 10683-73)

1. Номинальные частоты вращения (см. § 23.8, п. 11) генераторов и двигателей постоянного тока должны соответствовать указанным в табл. 23.8.

Таблица 23.8. Номинальные частоты вращения машин постоянного тока

Номинальная частота вращения, об/мин	Генераторы		Номинальная частота вращения, об/мин	Двигатели	
	Генераторы	Двигатели		Генераторы	Двигатели
25	—	×	2200	—	×
50	—	×	3000	×	×
75	—	×	4000	×	×
100	—	×	5000	×	×
125	—	×	6000	×	×
150	—	×	8000	×	×
200	—	×	10 000	×	×
300	—	×	12 000	×	×
400	×	×	15 000	×	×
500	×	×	18 000	—	×
600	×	×	20 000	—	×
750	×	×	22 000	—	×
1000	×	×	30 000	—	×
1500	×	×	40 000	—	×
2000	×	×	60 000	—	×

Примечания: 1. Знак × означает допустимость изготовления, тире — недопустимость изготовления.

2. Номинальные частоты вращения генераторов постоянного тока, когда их приводными двигателями являются асинхронные двигатели, могут быть меньше указанных в таблице на частоту вращения, определяемую величиной номинального скольжения приводного двигателя.

3. Допускаемые отклонения частоты вращения двигателей постоянного тока устанавливает ГОСТ 10683-73.

4. Номинальные частоты вращения двигателей, предназначенных для работы в электроприводе механизмов металлургических агрегатов и на подъемно-транспортных механизмах, должны соответствовать ГОСТ 184-71, малогабаритных автотракторных электродвигателей — ГОСТ 9443-79.

2. Номинальные частоты вращения электрических машин переменного тока (до 15 000 об/мин) при частотах тока, предусмотренных

ГОСТ 6697-83 в диапазоне от 50 до 1000 Гц, должны соответствовать: для синхронных двигателей и генераторов — указанным в табл. 23.9, для асинхронных трехфазных, двухфазных и однофазных двигателей — указанным в табл. 23.10.

Таблица 23.9. Номинальные частоты вращения синхронных машин

Номинальная частота вращения, об/мин	Синхронные двигатели (Д) и генераторы (Г) частоты, Гц									
	50		100		200		400		1000	
	Д	Г	Д	Г	Д	Г	Д	Г	Д	Г
100	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—
125	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
150	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
166,6	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
187,5	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
214,3	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
250	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
300	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
375	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
428,6	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
500	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
600	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
750	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	×	×	×	—	—	—	—	—	—	—
1500	×	×	×	×	—	×	×	×	×	×
3000	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
4000	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×
6000	—	—	×	×	×	×	×	×	×	×
8000	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×
10 000	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×
12 000	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×
15 000	—	—	—	—	—	—	—	×	×	—

Примечания: 1. Номинальные частоты вращения синхронных и индукторных генераторов, когда их приводными двигателями являются асинхронные двигатели, должны быть менее указанных в табл. 23.9 на значение, определяемое номинальным скольжением приводного двигателя.

2. Допускаемые отклонения номинальной частоты вращения синхронных двигателей должны определяться допускаемыми отклонениями частоты источника (сети), от которого питаются двигатели.

3. Допускаемые отклонения номинальной частоты вращения синхронных генераторов должны соответствовать ГОСТ 10683-73.

Номинальные частоты вращения машин переменного тока свыше 15 000 об/мин при частотах тока 2000, 4000 и 10 000 Гц также регламентированы ГОСТ 10683-73.

3. Номинальные частоты вращения электрических машин переменного тока при частотах тока, предусмотренных ГОСТ 6697-83 в диапазоне до 25 Гц, должны соответствовать синхронным частотам вращения, получающимся в результате исполнения электрических машин с числом полюсов:

2 и 4 для синхронных генераторов и двигателей;

2, 4, 6 и 8 для асинхронных двигателей (трех-, двух- и однофазных).

4. Номинальные частоты вращения универсальных коллекторных двигателей должны быть следующие: 1000, 1500, 2000, 3000, 5000, 8000, 10 000, 12 000, 15 000, 18 000 и 22 000 об/мин.

Таблица 23.10. Номинальные частоты вращения асинхронных электродвигателей

Номинальная частота вращения (синхронная) об/мин	Асинхронные двигатели частоты, Гц				
	50	100	200	400	1000
100	×	—	—	—	—
125	×	—	—	—	—
150	×	—	—	—	—
166,6	×	—	—	—	—
187,5	×	—	—	—	—
250	×	—	—	—	—
300	×	—	—	—	—
375	×	—	—	—	—
500	×	—	—	—	—
600	×	—	—	—	—
750	×	—	—	—	—
1000	×	—	—	—	—
1500	×	—	—	×	—
3000	×	×	—	×	×
4000	—	—	×	×	×
6000	—	×	×	×	×
8000	—	—	—	×	×
10 000	—	—	—	×	×
12 000	—	—	×	×	×
15 000	—	—	—	×	×

Примечание. Номинальные асинхронные частоты вращения могут быть меньше указанных в таблице на частоту вращения, определяемую номинальным скольжением.

5. Номинальные частоты вращения электрических машин специального исполнения (электродвигателей для привода гребных винтов; возбудителей; шаговых; импульсных; тяговых и др.; электрогенераторов автотракторных; для взрывных работ и др.) должны соответствовать стандартам или техническим условиям на эти машины и могут отличаться от указанных в данном параграфе.

23.15. ВЫСОТЫ ОСИ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН (ПО ГОСТ 13267-73)

1. За высоту оси вращения машины h (с горизонтальной осью вращения) принимается расстояние от оси вращения до опорной плоскости машины, измеренное на машине в середине выступающего конца вала (рис. 23.9).

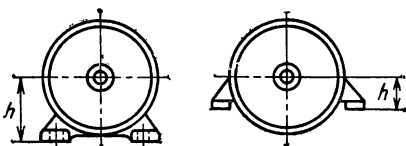


Рис. 23.9. Высота оси вращения электрической машины

2. Номинальные значения высот оси вращения машин должны соответствовать ряду 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000 мм.

Примечание. Указанные значения высот оси вращения распространяются на все конструктивные формы вновь разрабатываемых и модернизируемых (в части установочных размеров) электрических ма-

шин общего и специального назначения с горизонтальной осью вращения.

Отклонения от номинальной высоты оси вращения относительно опорной плоскости машины должны соответствовать ГОСТ 13267-73.

23.16. КОНЦЫ ВАЛОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ (ПО ГОСТ 12080-66)

1. ГОСТ 12080-66 распространяется на цилиндрические концы валов диаметром от 0,8 до 630 мм, предназначенные для посадки деталей, передающих крутящий момент в машинах и механизмах.

Концы валов предусматриваются двух исполнений: 1—длинные; 2—короткие.

2. Предпочтительные размеры концов валов диаметром от 5 до 250 мм указаны в табл. 23.11.

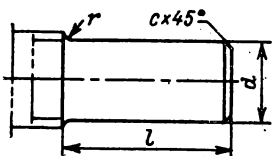


Рис. 23.10. Цилиндрический конец вала

3. Шпонки для валов исполнения 1: сегментные — по ГОСТ 24071-80 для вала диаметром d до 14 мм; призматические обыкновенные — по ГОСТ 23360-78 для вала диаметром d свыше 12 мм; тангенциальные нормальные — по ГОСТ 23360-78.

4. Шпонки для валов исполнения 2: призматические обыкновенные по ГОСТ 23360-78 для вала диаметром d до 30 мм; призматические высокие по ГОСТ 10748-79; тангенциальные усиленные по ГОСТ 24070-80 для вала диаметром d свыше 30 мм.

Таблица 23.11. Размеры цилиндрических концов валов, мм (рис. 23.10)

d	l		d	l	
	Исполнение			Исполнение	
	1	2		1	2
5	14	—	40; 45; 50; 55	110	82
6; 7	16		60; 70	140	105
8; 9	20		80; 90	170	130
10; 11	23	20	100; 110; 125	210	165
12; 14	30	25	140	250	200
16; 18	40	28	160; 180	300	240
20; 22	50	36	200; 220	350	280
25; 23	60	42	250	410	330
32; 36	80	58			

Примечание. Размеры r и s изменяются от 0,2 до 5,5 мм в зависимости от размера d в соответствии со шкалой, приведенной в ГОСТ 12080-66.

5. При сопряжении электрических двигателей и механизмов без промежуточных элементов для валов диаметром до 20 мм допускается увеличение длины концов валов в пределах двух диапазонов длин ниже фактического.

6. Допуски на концы валов для электрических машин — по ГОСТ 8592-79.

7. Для электрических машин малой мощности (с диаметром вала до 20 мм), у которых конец вала конструктивно является непосредственной частью исполнительного механизма, размеры вала, установленные стандартом, являются рекомендуемыми.

Примечание. В ГОСТ 12080-66 содержатся также рекомендуемые размеры цилиндрических концов валов с резьбовым концом.

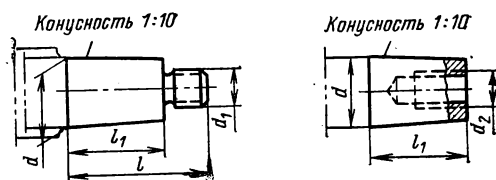


Рис. 23.11. Конический конец вала

5. В обоснованных случаях допускается изготовление концов валов:

- без шпоночных пазов;
- с левой резьбой.

Примечание. В ГОСТ 12081-72 содержатся также рекомендуемые размеры укороченных конических концов валов, полная длина l которых равна длине конической части концов валов того же диаметра d , указанной в табл. 23.12.

23.17. КОНЦЫ ВАЛОВ КОНИЧЕСКИЕ (ПО ГОСТ 12081-72)

1. ГОСТ 12081-72 распространяется на конические концы валов диаметром от 3 до 630 мм, предназначенные для посадки деталей, передающих крутящий момент в машинах и механизмах.

На тяговые и автотракторные электрические машины стандарт не распространяется.

Концы валов предусматриваются двух типов: 1—с наружной резьбой; 2—с внутренней резьбой (рис. 23.11).

Концы валов изготавливаются двух исполнений: 1—длинные; 2—короткие.

2. В табл. 23.12 указаны размеры концов валов 1-го исполнения диаметром от 5 до 220 мм. Размеры соответствуют размерам, приведенным на рис. 23.11.

3. Допускается при $d < 19$ мм применение сегментных шпонок по ГОСТ 24071-80; призматические шпопки — по ГОСТ 23360-78.

4. Проточки и фаски — по ГОСТ 10549-80.

Таблица 23.12. Размеры конических концов валов, мм (рис. 23.11)

d	l	l_1	d	l	l_1
5	14	9	32; 36	80	58
6; 7	16	10	40; 45; 50; 55	110	82
8; 9	20	12	60; 70	140	105
10; 11	23	15	80; 90	170	130
12; 14	30	18	100; 110; 125	210	165
16; 18	40	28	140	250	200
20; 22	50	35	160; 180	300	240
25; 28	60	42	200; 220	350	280

Примечание. Размеры d_1 и d_2 изменяются от М4 до М160×6 в зависимости от размера d в соответствии со шкалой, приведенной в ГОСТ 12081-72.

23.18. ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН (ПО ГОСТ 183-74 И ГОСТ 11828-75)

1. Программы испытаний машин постоянного тока, синхронных машин и асинхронных машин установлены ГОСТ 183-74.

2. Программа испытаний, которым подвергается каждая электрическая машина, выпускаемая предприятием-изготовителем, для всех видов машин включает:

измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками;

измерение сопротивления обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии;

испытание при повышенной частоте вращения (кроме асинхронных двигателей);

испытание изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками на электрическую прочность;

испытание междувитковой изоляции обмоток переменного тока (в машинах постоянного тока — якоря) на электрическую прочность;

для машин постоянного тока:
определение тока возбуждения генератора или частоты вращения электродвигателя при холостом ходе (для двигателей с последовательным возбуждением опыт проводят при независимом возбуждении);

проверку номинальных данных машины;
проверку коммутации при номинальной нагрузке и кратковременной перегрузке по току;

для синхронных машин:
определение характеристики установившегося трехфазного короткого замыкания (трехфазных машин) или однофазного короткого замыкания (однофазных машин);

определение характеристики холостого хода;

испытание возбудителя (по программе для машин постоянного тока);

проверку состояния уплотнений и определение утечки водорода (для машин с водородным охлаждением);

для асинхронных двигателей:
определение коэффициента трансформации (для двигателей с фазным ротором);

определение тока и потерь холостого хода;

определение тока и потерь короткого замыкания.

3. Общие методы испытаний электрических машин устанавливает ГОСТ 11828-75. Стандарт распространяется на все *виды электрических машин*.

Стандарт не распространяется на электрические машины, предназначенные для применения на подвижных средствах наземного, водного и воздушного транспорта, а также на электрические машины, предназначенные для применения в иных узкоспециальных отраслях.

Методы испытаний, относящиеся к отдельным видам машин (синхронным, асинхронным и машинам постоянного тока), устанавливаются стандартами на методы испытаний этих машин.

Применение методов испытаний предусматривается в стандартах и технических условиях на электрические машины, устанавливающих технические требования на них.

Стандартом предусматриваются следующие виды испытаний:

- измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками;

- измерение сопротивлений обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии;

- испытание машины при повышенной частоте вращения;

- испытание изоляции обмоток на электрическую прочность относительно корпуса машины, между обмотками и на электрическую прочность междувитковой изоляции;

- определение потерь и КПД машины (по ГОСТ 25941-83);

- измерение температуры частей машины и испытание на нагревание (по ГОСТ 25000-81);

- определение момента инерции вращающейся части машины (по СТ СЭВ 295-76);

- измерение вибрации (по ГОСТ 12379-75).

23.19. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Надежность электрических машин характеризует вероятность их безотказной работы. Например, надежность 0,95 означает, что из 100 машин за время, установленное ГОСТ или ТУ на соответствующий тип электрических машин, может выйти из строя 5 машин. При надежности 0,9—10 машин и т. д.

Практика эксплуатации электрических машин позволила выделить три основных периода их функционирования: период приработки, когда отказы происходят из-за технологических, конструктивных и производственных дефектов; период нормальной эксплуатации (отказы из-за случайных причин); период старения, когда проявляются отказы, вызванные износом элементов объекта. В начале периода приработки интенсивность отказов весьма значительная и затем постепенно падает. В период нормальной эксплуатации интенсивность отказов минимальна и в среднем постоянна. В период износа, который относится только к ре-

монтируемым изделиям многократного использования, отказы снова возрастают.

При определении надежности электрическая машина рассматривается как совокупность элементов, т. е. основных узлов, из которых она состоит.

Аналитическим или экспериментальным путем определяется надежность каждого из выделенных основных узлов. Затем определяется надежность машины в целом.

В электрических машинах выделяют следующие основные узлы: подшипники, коллекторно-щеточный аппарат, изоляция обмоток. Надежность каждого из выделенных узлов варьируется в значительных пределах в зависимости от типа машин, мощности, технологии производства, конструктивного решения и других факторов.

Изоляция обмоток электрических машин определяет надежность обмотки. Разрушение изоляции происходит в результате вибраций, нагрева, коммутационных перенапряжений, влажности, запыления, агрессивности окружающей среды.

Количество отказов подшипников для различных классов машин составляет 10—80 % общего числа отказов. Показателями работоспособности подшипников являются температура (обычно замеряется температура наружного кольца), время выбега, шум, спектр вибрационных частот.

В машинах постоянного тока подлежит исследованию на надежность также коллекторно-щеточный аппарат. Процент отказов двигателей постоянного тока по причине неблагоприятной работы коллекторно-щеточного узла колеблется от 10 до 50 %, у некоторых типов прокатных и тяговых двигателей — до 65 %.

При относительной простоте конструкции надежность асинхронных двигателей все еще остается весьма низкой. Средний срок службы около 20 000 ч (5 лет). В зависимости от сферы использования он составляет 60—80 тыс. ч (в химической промышленности), 5—6 тыс. ч (в горно-добывающей промышленности). Данное положение объясняется в основном условиями эксплуатации, низким качеством ремонта, технологическими дефектами и неправильным применением. Лишь 10—12 % двигателей выходят из строя вследствие процессов старения и износа.

Наряду со статистической обработкой данных эксплуатации для оценки надежности электрических машин используются также определительные и контрольные испытания на надежность. Определительные испытания проводятся для определения фактических показателей: надежности, контрольные — для контроля соответствия показателей надежности требованиям стандартов или технических условий.

Срок службы современных электрических машин составляет десятки тысяч часов. Поэтому испытания на надежность, как определительные, так и контрольные, длительные и дорогостоящие. Сокращение времени испытаний обеспечивается проведением ускоренных испытаний на надежность. В этом случае испытания электрических машин проводятся в специальных условиях, характеризующихся повышенным уровнем некоторых воздействующих факторов.

23.20. ОСНОВНЫЕ СТАНДАРТЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Основные технические требования, которым должны соответствовать электрические машины всех видов и исполнений, формулируются в следующих стандартах:

ГОСТ 183-74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования;

ГОСТ 17154-71. Машины электрические вращающиеся. Характеристики, расчетные параметры и режимы работы. Термины и определения;

ГОСТ 12139-84. Машины электрические вращающиеся. Ряд номинальных мощностей;

ГОСТ 10683-73. Машины электрические. Номинальные частоты вращения и допускаемые отклонения;

ГОСТ 13267-73. Машины электрические и непосредственно соединяемые с ними неэлектрические. Высоты оси вращения;

ГОСТ 2479-79. Машины электрические вращающиеся. Условные обозначения конструктивных исполнений по способу монтажа;

ГОСТ 12.2.007.1-75. Система стандартов безопасности труда. Машины электрические вращающиеся. Требования безопасности;

ГОСТ 16372-84. Машины электрические вращающиеся. Допустимые уровни шума;

ГОСТ 12379-75. Машины электрические вращающиеся. Методы оценки вибрации;

ГОСТ 11929-81. Машины электрические вращающиеся. Методы определения уровня шума;

ГОСТ 25000-81. Машины электрические вращающиеся. Методы испытания на нагревание;

ГОСТ 25941-83. Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия;

ГОСТ 20459-75. Машины электрические вращающиеся. Способы охлаждения. Обозначения;

ГОСТ 4541-70. Машины электрические вращающиеся. Обозначения буквенные установочно-присоединительных и габаритных размеров;

ГОСТ 18709-73. Машины электрические вращающиеся. Установочно-присоединительные размеры;

ГОСТ 17494-72. Машины электрические напряжением до 1000 В. Степени защиты;

ГОСТ 16921-83. Машины электрические вращающиеся. Допустимые вибрации;

СТ СЭВ 169-75. Машины электрические. Виды, термины и определения;

ГОСТ 11828-75. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний.

Стандарты, в которых дополнительно формулируются требования к отдельным видам электрических машин (асинхронные, синхронные и машины постоянного тока), указываются в § 24.3, 24.16 и 24.35.

Б. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ

23.21. ГЛАВНЫЕ РАЗМЕРЫ, МАШИННАЯ ПОСТОЯННАЯ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ

Проектирование электрической машины — сложная техническая задача, которая условно разбивается на несколько тесно взаимосвязанных этапов: разработка конструкции, выбор размеров активных частей, выбор типа и схем обмоток, выполнение поверочных электромагнитных, тепловых, вентиляционных и механических расчетов.

Электрическая машина должна не только удовлетворять техническому заданию и техническим требованиям, предъявляемым к машинам данного типа, а также быть оптимальной по своим технико-экономическим показателям. Критериями оптимальности в зависимости от назначения машины могут быть масса, размеры, стоимость, энергетические показатели и др. Как правило, машины выпускаются сериями, в пределах которой они имеют единую конструкцию и технологию производства, поэтому очень важное значение имеют вопросы унификации деталей и отдельных конструктивных узлов. Чтобы наилучшим образом удовлетворить столь многообразным требованиям, предъявляемым к электрическим машинам, при проектировании, по существу, приходится иметь дело с большим количеством вариантов машин, отличающихся теми или иными параметрами. Значительно облегчить задачу проектирования помогают рекомендации, выработанные на основе анализа многолетнего опыта

создания и эксплуатации электрических машин различных типов.

Технико-экономические показатели, размеры, масса и стоимость электрической машины зависят от ее главных размеров — внутреннего диаметра сердечника якоря D (в машинах постоянного тока D — внешний диаметр якоря) и его длины l .

В свою очередь главные размеры зависят от мощности машины, частоты вращения, а также от основных электромагнитных нагрузок в номинальном режиме — индукции $B_{\text{ном}}$ в воздушном зазоре и линейной нагрузки A (линейная нагрузка A — суммарное действующее значение тока всех проводников обмотки, отнесенное к единице длины окружности якоря: $A = 2\pi w l / \pi D$).

Расчетная мощность электрической машины S_p выражается через номинальную электрическую активную мощность на выводах машины $P_{\text{э, ном}}$, которая для генераторов равна номинальной активной мощности ($P_{\text{э, ном}} = P_{\text{ном}}$), а для двигателей определяется через номинальную механическую мощность на валу и КПД ($P_{\text{э, ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}}$) (см. § 23.8, п. 5):

для машин переменного тока

$$S_p = k_E P_{\text{э, ном}} / \cos \varphi_{\text{ном}};$$

для машин постоянного тока

$$S_p = P_p = k_E P_{\text{э, ном}},$$

где $\cos \varphi_{\text{ном}}$ — номинальный коэффициент мощности; $k_E = E_{\text{ном}} / U_{\text{ном}}$, где $E_{\text{ном}}$ и $U_{\text{ном}}$ — ЭДС фазы обмотки при номинальной нагрузке

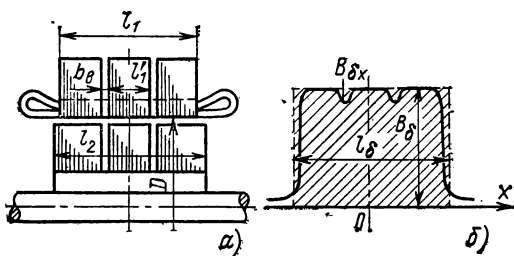


Рис. 23.12. Основные размеры электрической машины: а — продольный разрез машины; б — кривая индукции в воздушном зазоре

и номинальное фазное напряжение обмотки якоря.

Расчетная мощность машины S_p , ее главные размеры и электромагнитные нагрузки связаны между собой машинной постоянной Арнольда, $\text{м}^3/\text{Дж}$,

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \Omega}{S_p} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_w B_{\text{ном}} A},$$

где $l_\delta = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} B_{\delta x} dx \right) / B_\delta$ — расчетная длина машины (рис. 23.12); α_δ , k_B , k_w — коэффициенты, характеризующие форму поля в зазоре машины (см. ниже).

Расчетная длина машины l_δ может быть выражена через длину сердечника якоря l_1 с учетом влияния на поле в зазоре радиальных вентиляционных каналов и торцевых частей (рис. 23.12):

$$l_\delta = l_1 - n_b b'_b + 2\delta_{\text{ср}},$$

где $\delta_{\text{ср}}$ — средний зазор между статором и ротором [в неявнополюсных машинах $\delta_{\text{ср}} = \delta$, в явнополюсных машинах $\delta_{\text{ср}} = \delta + (\delta_{\text{max}} - \delta)/3$, где δ_{max} — зазор под краем полюсного наконечника]; n_b — число вентиляционных каналов. Расчетная ширина канала b'_b определяется по формуле

$$b'_b = \gamma' c_0 \delta_{\text{ср}}; \quad \gamma' = \frac{(b_b / c_0 \delta_{\text{ср}})^2}{5 + b_b / c_0 \delta_{\text{ср}}},$$

где $c_0 = 1$ при каналах только на статоре или только на роторе; $c_0 = 0.5$ при каналах и на статоре, и на роторе. Обычная длина пакетов $l_1 \leq 4 \div 5$ см, и ширина каналов $b_b = 1$ см.

Из формулы для C_A видно, что чем меньше машинная постоянная, тем выше электромагнитные нагрузки, тем меньше размеры машины при заданной мощности и частоте вращения.

Технико-экономические показатели машины существенно зависят от отношения $\lambda = l_\delta / \tau$, где τ — полюсное деление (см. § 23.22). Выбор λ , а также уровня электромагнитных нагрузок во многом определяется назначением машины, мощностью, частотой вращения, способом охлаждения и др. В руководствах по проектированию электрических машин даются рекомендации по выбору значений машинной

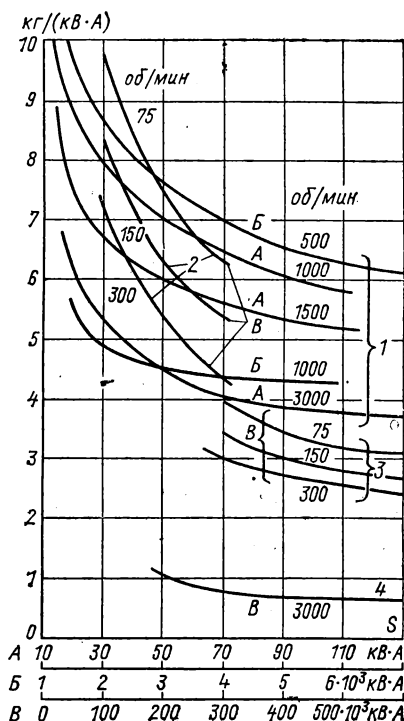


Рис. 23.13. Относительная масса электрических машин (ориентировочные значения):

1 — машины переменного тока общего назначения; 2 — гидрогенераторы с воздушным охлаждением обмоток; 3 — гидрогенераторы с водяным охлаждением обмотки статора; 4 — турбогенераторы с непосредственным водяным охлаждением обмотки статора и непосредственным водородным охлаждением обмотки ротора

постоянной и электромагнитных нагрузок для различных типов и исполнений машины.

Представление о показателях электрических машин можно получить из рис. 23.13, на котором указаны ориентировочные значения относительной массы машины (полная масса, отнесенная к единице полной мощности), $\text{кг}/(\text{кВ} \cdot \text{А})$, в зависимости от мощности, частоты вращения и способа охлаждения активных частей.

23.22. ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Общая характеристика якорных обмоток.

К якорным обмоткам относятся обмотки статоров (якорей) асинхронных и синхронных машин и обмотки фазных роторов асинхронных машин. Многофазные симметричные обмотки с числом фаз m состоят из m идентичных фазных обмоток, которые соединяются либо в многоугольник (при $m=3$ — треугольник), либо в звезду. Обмотки фаз взаимно смещены на электрический угол $360^\circ/m$. Обмотка фазы образуется из отдельных катушек и катушечных групп, которые соединяются либо последовательно, либо параллельно, но так, что протекающий по обмотке ток создает маг-

нитное поле с заданным числом p периодов (пар полюсов).

Катушка представляет собой один или несколько последовательно соединенных витков, расположенных в одних и тех же пазах и имеющих общую изоляцию от стенок паза.

Прямолинейные части катушек, которые укладываются в пазы, называются *пазовыми частями* или *катушечными сторонами*. Части катушек, выходящие за пределы сердечника якоря, называются *лобовыми частями*.

Катушечной группой называют катушки одной фазы обмотки, расположенные в соседних пазах и, как правило, последовательно соединенные друг с другом.

Катушки и катушечные группы соединяют в *параллельную ветвь*, под которой понимается цепь последовательно включенных катушек обмотки фазы, присоединяемых к ее внешним выводам.

Шаг катушки — расстояние между ее сторонами. Он измеряется либо в долях полюсного деления, либо в зубцовых делениях (зубцовое деление — расстояние между серединами двух соседних пазов, измеренное по поверхности сердечника якоря). Шаг, равный полюсному делению, называют полным или диаметрально.

Полюсным делением называют дугу окружности сердечника якоря, приходящуюся на один полюс основной гармонической поля:

$$\tau = \pi D/2p.$$

Симметричная обмотка характеризуется тем, что ЭДС, наведенные во всех фазах обмотки, равны между собой, а ЭДС, наведенные в каждой паре соседних фаз, смещены во времени на один и тот же угол.

Обмотка переменного тока характеризуется:

- а) числом пар полюсов p ;
- б) числом фаз m ;
- в) числом пазов на полюс и фазу

$$q = Z/2pm,$$

где Z — число пазов сердечника;

- г) шагом катушки (обмотки) y ;
- д) числом a параллельных ветвей фазы;
- е) числом последовательно включенных витков w в параллельной ветви;
- ж) сопряжением фаз.

2. Классификация обмоток. Якорные обмотки могут быть классифицированы по ряду важных признаков, определяющих их электромагнитные, конструктивные и технологические свойства:

по числу фаз — на однофазные и многофазные;

по числу слоев в пазу — на однослойные (рис. 23.14, а) и двухслойные (рис. 23.14, б).

Главные преимущества двухслойной обмотки перед однослойной заключаются в возможности улучшения формы поля путем укорочения шага и в большей технологичности (все катушки имеют одинаковые размеры). Практически все электрические машины переменного тока средней и большой мощности выполняются с двухслойными обмотками;

по числу пазов на полюс и фазу q — на целые (q — целое число) и дробные (q — дроб-

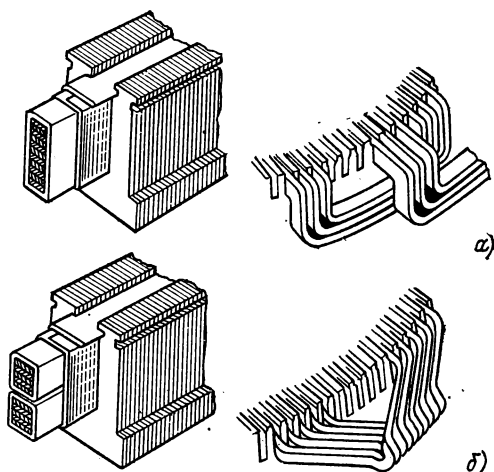


Рис. 23.14. Однослойная (а) и двухслойная (б) обмотки

ное число). Наибольшее распространение получили целые обмотки, особенно в асинхронных машинах и в турбогенераторах. Дробные обмотки, в которых может быть получена ЭДС, по форме более близкая к синусоидальной, чем в целых обмотках, применяются преимущественно в многополюсных синхронных генераторах (гидрогенераторах) и двигателях;

по технологии изготовления катушек — на мягкие и жесткие. Мягкие (или «всыпные») обмотки выполняются из провода круглого сечения и вкладываются («всыпаются») в полузакрытые пазы по одному проводнику, применяются в электрических машинах малой и средней мощности (примерно до 100 кВт). Жесткие обмотки выполняются из провода прямоугольного сечения, полностью формуются до укладки в пазы (открытые или полуоткрытые), применяются в электрических машинах средней и большой мощности;

по шагу обмотки — с полным и неполным шагом. Двухслойные обмотки обычно выполняются с укороченным шагом $y \approx 0,8 \tau$. Наиболее распространенные однослойные обмотки хотя и имеют катушки с шагом, отличным от полного, в электромагнитном отношении являются обмотками с полным шагом (см. п. 5).

3. Форма пазов сердечников. В сердечниках для укладки обмотки применяются полузакрытые, полуоткрытые и открытые пазы.

У *полузакрытых пазов* (рис. 23.15, а—е) ширина шлица (открытия) $b_{ш}$ несколько больше диаметра изолированного провода, из которого намотана мягкая катушка обмотки. Полузакрытые пазы применяются в электрических машинах мощностью примерно до 100 кВт. Полузакрытые пазы, показанные на рис. 23.15, в, применяются для короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей. Укладка обмотки производится путем забивки стержней в пазы сердечника ротора.

У *полуоткрытых пазов* (рис. 23.15, б) ширина шлица несколько больше половины ширины паза. Такие пазы применяются для машин мощностью 100—400 кВт, имеющих жест-

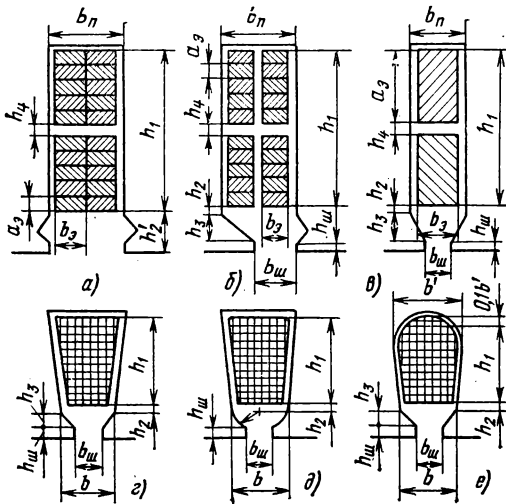


Рис. 23.15. Формы пазов якорных обмоток

кую обмотку, каждая катушка которой подразделяется на две конструктивно самостоятельные части.

Открытые пазы (рис. 25.15, а) применяются обычно в высоковольтных машинах, обмотки которых состоят из жестких катушек, полностью изолированных до укладки в пазы.

Ширина шлица паза влияет на свойства машины и определяется как из расчетных соображений, так и в зависимости от конструкции катушки.

4. Принцип составления схемы обмотки. Схема обмотки составляется таким образом, чтобы при заданном числе пазов (а в двухслойных обмотках — и при предварительно выбранном шаге обмотки) основная гармоническая магнитного поля наводила в фазе обмотки максимальную ЭДС.

Составление схемы обмотки или распределение пазов по фазам удобно производить с помощью звезды векторов пазовых ЭДС обмотки. Пусть, например, нужно разместить трехфазную обмотку (\$m=3\$), имеющую число полюсов \$2p=8\$, в сердечнике с числом пазов

\$Z=48\$. Сдвиг по фазе ЭДС проводников, расположенных в соседних пазах, равен:

$$\alpha = \frac{360p}{Z} = \frac{360 \cdot 4}{48} = 30^\circ.$$

На рис. 23.16, а построена звезда векторов ЭДС, которые наводятся основной гармонической поля в проводниках обмотки. Рядом с каждым вектором указан номер паза, которому он соответствует. Начало нумерации пазов выбирается произвольно. После обхода пазов, расположенных на двух полюсных делениях (в данном случае 12 пазов), т.е. в пределах полного электрического угла \$360^\circ\$, звезда векторов пазовых ЭДС при целом числе \$q\$ повторяется (векторы 13, 14, ..., 48 накладываются последовательно на векторы 1, 2, ..., 12). Чтобы ЭДС обмотки фазы была наибольшей, в нее следует включить проводники, геометрическая сумма ЭДС которых максимальна. В соответствии с этим для распределения проводников по фазам надо разделить звезду векторов пазовых ЭДС на шесть равновеликих секторов по \$60^\circ\$ и отнести к каждой фазе проводники, векторы ЭДС которых расположены в противоположных секторах звезды, должны быть включены встречно. Такое включение соответствует повороту векторов ЭДС на электрический угол \$180^\circ\$. При встречном включении проводников, соответствующих векторам, например нечетных секторов звезды, диаграмма приобретает вид, показанный на рис. 23.16, б. В каждой фазе ЭДС равна сумме векторов ЭДС, наведенных в проводниках этой фазы, а взаимный сдвиг во времени ЭДС обмоток фаз получается равным \$120^\circ\$. На рис. 23.17 показана схема однослойной обмотки, соответствующая звезде векторов пазовых ЭДС на рис. 23.16, б.

В каждом секторе звезды рис. 23.16, а имеется \$q\$ лучей, на которых располагаются векторы пазовых ЭДС. Двум полюсным делениям, или \$360^\circ\$, соответствуют \$6q\$ пазов, а значит, и \$6q\$ векторов звезды. Следовательно, в пределах одного полюсного деления каждой фазе соответствуют \$q\$ пазов, расположенных в пределах электрического угла \$60^\circ\$. Такие обмотки называют обмотками с \$60^\circ\$-градусной фазной зоной. Помимо обмоток с \$60^\circ\$-градусной

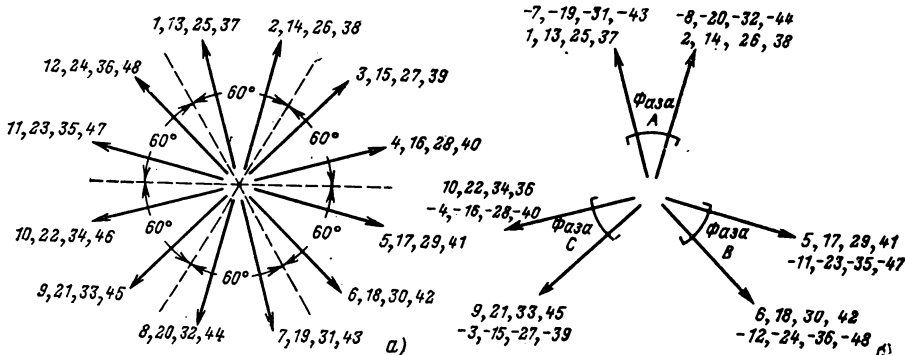


Рис. 23.16. Звезда векторов пазовых ЭДС обмотки:

$$Z=48, 2p=8$$

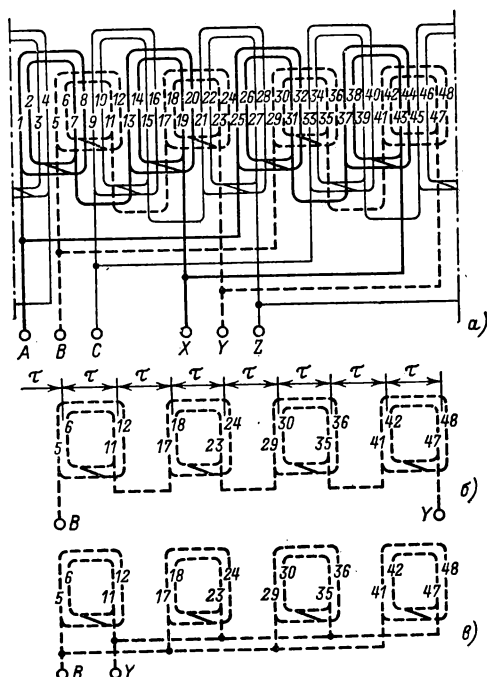


Рис. 23.17. Схема однослойной концентрической трех-
плоскостной обмотки:

$$Z=48, 2p=8, m=3, q=2$$

фазной зоной встречаются трехфазные обмотки со 120-градусной фазной зоной, а также обмотки с неравновеликими фазными зонами. Однако наиболее употребительными являются обмотки с 60-градусной фазной зоной, имеющие максимальный коэффициент распределения для основной гармонической МДС.

5. Однослойные обмотки. Однослойные обмотки применяются в электрических машинах небольшой мощности (примерно до 12 кВт). Практическое применение нашли два основных вида однослойных обмоток — *концентрические* и *шаблонные*, отличающиеся друг от друга по выполнению катушек, катушечных групп и размещению лобовых частей. Шаблонные обмотки, в которых все катушки имеют одинаковую форму, бывают следующих типов: простая шаблонная обмотка, шаблонная обмотка «вразвалку», цепная обмотка [23.15]. В концентрической обмотке катушки, образующие катушечную группу, охватывают одна другую. Лобовые части концентрических обмоток располагаются в двух или трех плоскостях.

На рис. 23.17 изображена схема трехплоскостной концентрической обмотки. Каждая фаза обмотки образуется из p катушечных групп; в группу входят q концентрически расположенных катушек различного шага. Лобовые части катушек одной фазы располагаются в одной плоскости. Полное число катушек обмотки равно $Z/2 = pqt$. При нечетном числе q шаг средней катушки катушечной группы равен τ , шаги внутренних катушек меньше τ , а шаги внешних катушек больше τ . При четном числе q одна половина катушек имеет шаг, меньше τ , а вторая половина катушек — больше τ .

Катушки одной катушечной группы включаются согласно, так что ток протекает в них в одном направлении. Соседние катушечные группы фазы включаются в схему обмотки также согласно.

При последовательном включении всех катушечных групп фазы она имеет одну параллельную ветвь ($a=1$). Максимально возможное число параллельных ветвей равно числу катушечных групп фазы ($a_{\max}=p$). При $p \geq 4$ (и не являющемся простым числом) возможно последовательно-параллельное включение катушечных групп, при котором $1 < a < p$.

Схема обмотки может быть составлена по звезде векторов пазовых ЭДС. Для трехфазной обмотки на рис. 23.17 звезда векторов пазовых ЭДС построена на рис. 23.16. Распределение пазов по фазам производится в соответствии с п. 4. На рис. 23.17,а показана схема обмотки при $a=2$, на рис. 23.17,б — схема фазы В при $a=1$, на рис. 23.17,в — схема фазы В при $a_{\max}=p=4$.

Особенность концентрических обмоток заключается в том, что вследствие различия размеров лобовых частей катушек отдельных фаз сопротивления фаз получаются различными. В этом смысле концентрические обмотки — несимметричные.

Одним из основных требований, предъявляемых к обмоткам электрических машин, которое оказывает существенное влияние на выбор того или иного типа обмотки, является технологичность изготовления. Для использования механизированной намотки обмотка должна быть концентрической и укладываться без «подъема шага», т. е. каждая из ее катушек должна укладываться в пазы обеими сторонами одновременно. Однослойные обмотки удовлетворяют этим требованиям, но имеют ряд недостатков, которые становятся существенными для двигателей мощностью 15 кВт и выше. В последнее время разработаны обмотки, удовлетворяющие требованиям механизированной укладки и сохраняющие преимущества двухслойных обмоток.

К таким обмоткам относится двухслойная концентрическая обмотка без подъема шага, которая отличается от обычной двухслойной обмотки распределением катушек в слоях и порядком укладки в пазы. Другим типом обмотки для механизированной укладки является концентрическая симметричная одно- или двухслойная обмотка. Каждая фаза такой обмотки состоит из $2p$ одинаковых катушечных групп, каждая из которых включает в себя одну большую катушку и $q-2$ малых. Большая катушка занимает весь паз, малые укладываются в два слоя. Обмотка может быть выполнена при $q > 2$.

6. Двухслойные петлевые обмотки с целым числом q являются наиболее распространенным типом обмоток машин переменного тока. Применяются для статоров многофазных асинхронных и синхронных машин средней и большой мощности, а также для роторов асинхронных двигателей с фазным ротором средней мощности (до 100 кВт). Каждая фаза обмотки образуется из $2p$ одинаковых катушечных групп; в группу входят q катушек (рис. 23.18). Катушки всех фаз имеют одинаковые формы и размеры. Полное число кату-

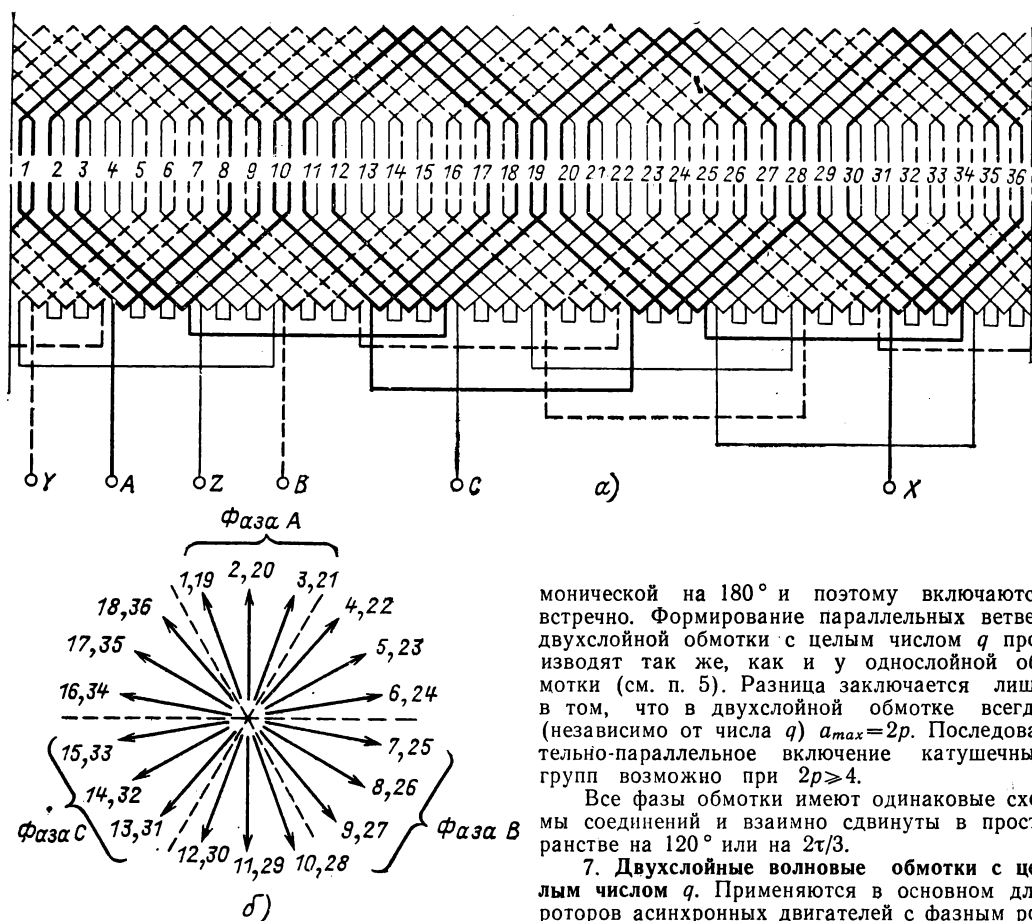


Рис. 23.18. Схема двухслойной петлевой обмотки:
 $Z=36$, $2p=4$, $m=3$, $q=3$

шек обмотки равно $Z=2pqt$. Статорные обмотки имеют укороченный шаг; обычно выбирают $y \approx 0,8t$, чтобы существенно ослабить 5-ю и 7-ю гармонические магнитного поля обмотки. Роторные обмотки чаще выполняются с полным шагом $y \approx t$.

Катушки катушечной группы включаются согласно.

На полюсном делении катушечные стороны одной фазы занимают в каждом пазовом слое (верхнем или нижнем) по q соседних пазов, составляющих фазную зону обмотки.

Схема обмотки может быть составлена на основе звезды векторов пазовых ЭДС или звезды векторов катушечных ЭДС. Будем нумеровать катушки трехфазной обмотки (рис. 23.18,а) номерами пазов, в которых расположены левые катушечные стороны. ЭДС соседних катушек взаимно сдвинуты по фазе на электрический угол $\alpha = 360p/Z = 360 \cdot 2/36 = 20^\circ$. На рис. 23.18,б построена звезда векторов катушечных ЭДС. Для распределения катушек по фазам обмотки с 60-градусной фазной зоной надо поступить в соответствии с п. 4, помня, что теперь каждый вектор звезды изображает не пазовую, а катушечную ЭДС.

Соседние катушечные группы фазы взаимно сдвинуты в магнитном поле основной гар-

монической на 180° и поэтому включаются встречно. Формирование параллельных ветвей двухслойной обмотки с целым числом q производят так же, как и у однослойной обмотки (см. п. 5). Разница заключается лишь в том, что в двухслойной обмотке всегда (независимо от числа q) $a_{\max} = 2p$. Последовательно-параллельное включение катушечных групп возможно при $2p \geq 4$.

Все фазы обмотки имеют одинаковые схемы соединений и взаимно сдвинуты в пространстве на 120° или на $2\tau/3$.

7. Двухслойные волновые обмотки с целым числом q . Применяются в основном для роторов асинхронных двигателей с фазным ротором средней и большой мощности (выше 100 кВт). В этом случае они выполняются в виде стержневых обмоток с двумя стержнями в пазу (один виток в катушке). Преимущественное применение волновых обмоток для роторов асинхронных двигателей объясняется тем, что они являются более технологичными и надежными, так как требуют меньшего количества паяк в лобовых частях. Кроме того, они позволяют получить меньшее значение напряжения на контактных кольцах.

В волновых обмотках (рис. 23.19) различают первый (задний) частичный шаг y_1 — расстояние между сторонами одной катушки и второй (передний) частичный шаг y_2 — расстояние между следующими друг за другом сторонами двух катушек. Под шагом волновой обмотки понимается расстояние $y = y_1 + y_2$, т.е. расстояние между двумя следующими друг за другом катушками. Всегда первый частичный шаг $y_1 = \tau$, второй шаг также $y_2 = \tau$, и только в конце обхода сердечника $y_2 = \tau \pm 1$.

На полюсном делении стержни одной фазы занимают в каждом пазовом слое по q соседних пазов, составляющих фазную зону обмотки.

Схема обмотки может быть составлена на основе звезды векторов пазовых ЭДС или катушечных ЭДС. При составлении схемы трехфазной обмотки (рис. 23.19,а) будем обозначать катушки номерами пазов, в которых расположены левые катушечные стороны.

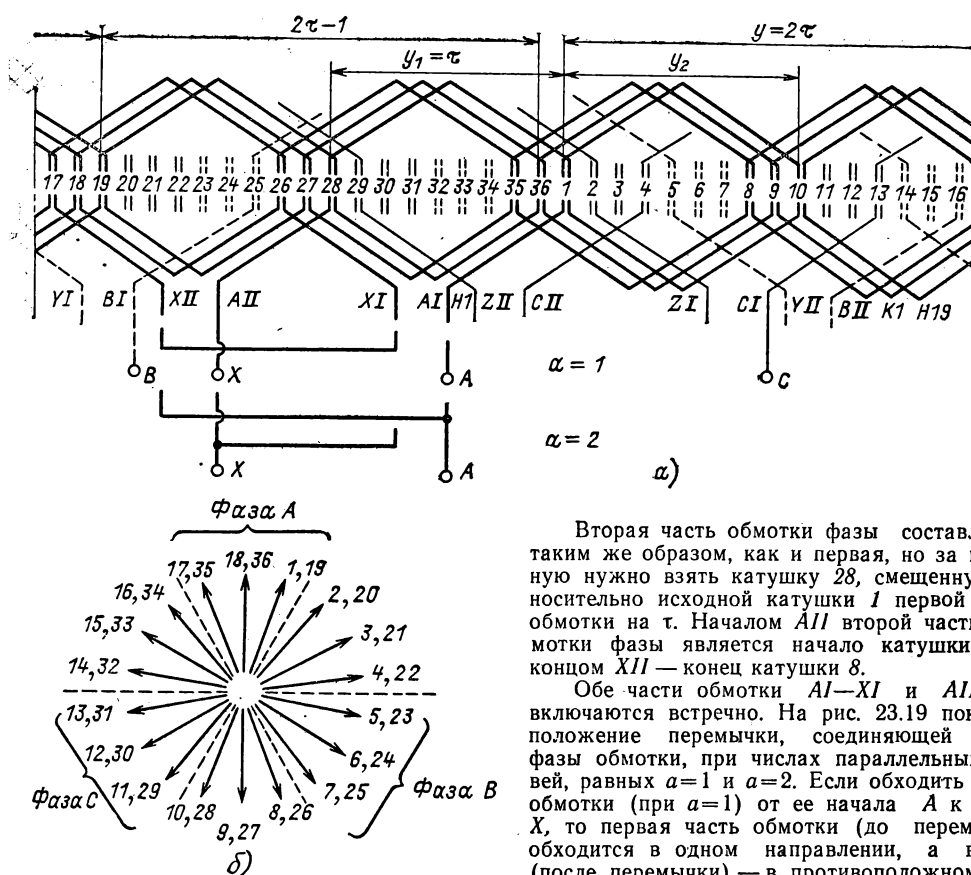


Рис. 23.19. Схема двухслойной волновой обмотки:
 $Z=36$, $2p=4$, $m=3$, $q=3$

На рис. 23.19,б построена звезда векторов катушечных ЭДС для обмотки по рис. 23.19,а; ЭДС соседних катушек взаимно сдвинуты по фазе на угол $\alpha = 360p/Z = 360 \cdot 2/36 = 20^\circ$.

В качестве примера рассмотрено формирование фазы А обмотки, включающей катушки, векторы ЭДС которых расположены в соответствующих зонах звезды (рис. 23.19,б). За начальную принята катушка 1. Конец К1 этой катушки соединен с началом Н19 катушки 19 (смещенной относительно катушки 1 на $y = 2\tau$), конец этой катушки — с началом катушки 36 и т.д. Таким образом, в фазу обмотки включаются согласно катушки, взаимно смещенные на 2τ . Через p катушек совершен один полный обход сердечника. Всего нужны q обходов в одном направлении. Чтобы обмотка не замкнулась сама на себя в конце обхода, расстояние между последней катушкой предыдущего обхода (например, катушкой 19) и первой катушкой следующего обхода (катушкой 36) должно быть взято $2\tau-1$ (укороченный переход — см. рис. 23.19,а) или $2\tau+1$ (удлиненный переход). После q обходов получена первая часть обмотки А1—Х1. Каждая фаза обмотки состоит из двух частей, соединенных между собой последовательно или параллельно.

Вторая часть обмотки фазы составляется таким же образом, как и первая, но за исходную нужно взять катушку 28, смещенную относительно исходной катушки 1 первой части обмотки на τ . Началом АII второй части обмотки фазы является начало катушки 28, а концом ХII — конец катушки 8.

Обе части обмотки А1—Х1 и АII—ХII включаются встречно. На рис. 23.19 показано положение перемычки, соединяющей части фазы обмотки, при числе параллельных ветвей, равных $a=1$ и $a=2$. Если обходить фазу обмотки (при $a=1$) от ее начала А к концу Х, то первая часть обмотки (до перемычки) обходится в одном направлении, а вторая (после перемычки) — в противоположном направлении. Все три фазы обмотки имеют только три соединительные перемычки.

Две другие фазы обмотки (на рис. 23.19 не показаны) формируются так же, как и фаза А—Х.

Если число p не делится на 3, то выводные концы обмоток фаз можно расположить симметрично, с взаимным сдвигом на $1/3$ окружности сердечника (рис. 23.19), что важно в отношении балансировки ротора. Если же число p кратно 3, то начала фаз взаимно сдвигают на электрические углы 120° и 240° или эквивалентные им углы.

8. Двухслойные петлевые обмотки с дробным числом q . Применяются в основном для статоров мощных многополюсных синхронных генераторов, так как позволяют в отличие от обмоток с целым числом q получить кривую ЭДС практически синусоидальной формы. Очень редко они применяются и для статоров асинхронных двигателей, когда один штамп используется для изготовления листов сердечников двигателей с двумя различными числами полюсов, при одном из которых число q оказывается дробным.

Полное число катушек обмотки равно $Z=2pqm$. Все катушки имеют одинаковые размеры.

Дробное число q можно представить в виде $q=b+c/d$, где b — целое число, c/d — правильная несократимая дробь. При $b \geq 1$ (обычно применяются только такие обмотки) каждая фаза, как и в случае целого числа q ,

содержит $2p$ катушечных групп. Полное число катушек в фазе $2pq$.

Число d , называемое «знаменателем дробности», равно числу полюсных делений, на протяжении которых располагается повторяющаяся по своей структуре часть обмотки. Вся обмотка состоит из $2p/d$ одинаковых по своей структуре частей. При четном числе d обмотка состоит из $2p/d$, а при нечетном числе d — из p/d одинаковых частей, повторяющихся по своему расположению в магнитном поле основной гармонической. Такую повторяющуюся часть обмотки называют «первоначальной обмоткой». «Первоначальная обмотка» размещается в $Z' = Z/t$ пазах, и ей соответствуют $p' = p/t$ пар полюсов, где t — общий наибольший делитель чисел Z и p . При больших Z , когда $t > 1$, можно ограничиться составлением схемы первоначальной обмотки.

Особенность обмоток с дробным числом заключается в том, что они состоят из катушечных групп с различным числом катушек: в «малых» группах — по b катушек, в «больших» — по $b+1$ катушке. Эти группы чередуются в определенном порядке в зависимости от дробной части q . Знаменатель дробности d равен числу катушечных групп всех фаз обмотки, через которые повторяется чередование «малых» и «больших» групп. В одном «чередовании» обмотки из d катушечных групп имеется $d-c$ «малых» и c «больших» групп. Каждому полюсному делению соответствует одна катушечная группа фазы (при $q > 1$). Полное число катушечных групп трехфазной обмотки $6p$. Число «чередований» всей обмотки $6p/d$.

Условия симметрии обмотки:

- 1) $2p/d$ равно целому числу;
- 2) d/m равно дробному числу (знаменатель дробности d не должен быть кратен числу фаз).

Максимальное число параллельных ветвей фазы обмотки $a_{max} = 2p/d$. Любое возможное меньшее число параллельных ветвей a определяется из условия: $2p/ad$ равно целому числу.

Схема обмотки может быть составлена, как и схема обмотки с целым числом q (п. 6), при помощи звезды векторов катушечных ЭДС. На рис. 23.20,б построена звезда векторов катушечных ЭДС трехфазной обмотки по рис. 23.20,а. Катушки, векторы ЭДС которых располагаются в противоположных 60-градусных секторах звезды, образуют одну фазу. Катушки одного сектора включаются согласно друг с другом, а катушки противоположных секторов — встречно. За начальную катушку обмотки фазы может быть выбрана любая катушка, принадлежащая фазе.

Способ составления схемы дробной обмотки по звезде векторов катушечных ЭДС при больших числах d оказывается громоздким. Один из простых способов заключается в следующем:

а) определяются числа катушек в «малой» группе b и в «большой» группе $b+1$;

б) записывается ряд из c чисел:

$$\frac{d}{c}; 2 \frac{d}{c}; 3 \frac{d}{c}; \dots; c \frac{d}{c} = d.$$

Каждое дробное число заменяется ближайшим большим целым числом и в результате получается ряд из c чисел:

$$N_1; N_2; N_3; \dots; d.$$

Этот ряд чисел указывает номера «больших» групп в порядке следования катушечных групп всех фаз вдоль окружности сердечника для одного «чередования» обмотки;

в) начиная с произвольной исходной катушки составляются N_1-1 «малых» катушеч-

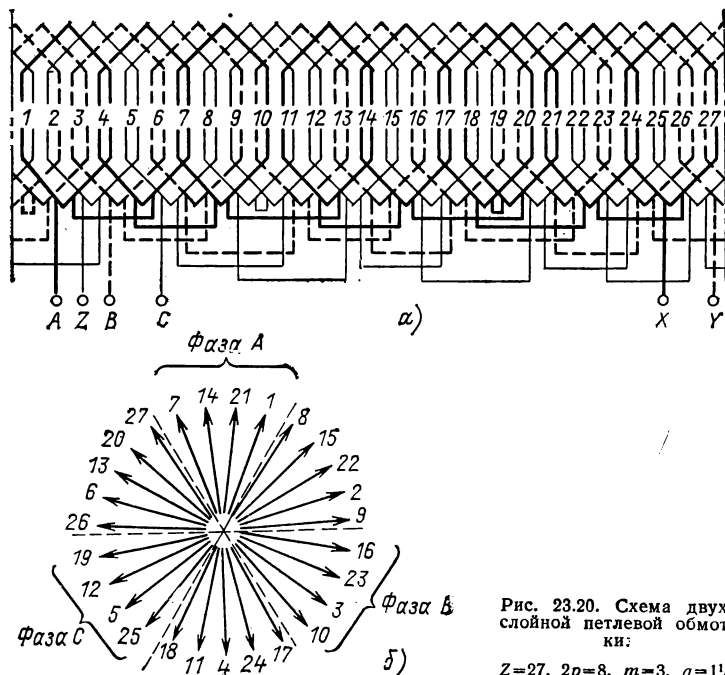


Рис. 23.20. Схема двух-слойной петлевой обмотки:

$$Z=27, 2p=8, m=3, q=1\frac{1}{3}$$

ных групп по b катушек в каждой. Следующая, N_1 -я катушечная группа — «большая» — состоит из $b+1$ катушек. Далее аналогичным образом формируются следующие катушечные группы: группы с номерами $N_2, N_3, \dots, d$ — «большие», остальные группы — «малые». В таком же порядке составляются еще два «чередования» обмотки (имеется в виду трехфазная обмотка);

г) составляются схемы обмоток фаз. В одну фазу включается каждая третья катушечная группа. Соседние катушечные группы включаются встречно.

Пример. $Z=57$; $2p=8$; $m=3$; $q=2\frac{3}{4}$ ($b=2$; $c=3$; $d=8$).

Число катушечных групп в первоначальной обмотке

$$3d = 3 \cdot 8 = 24.$$

Число катушек в «малых» группах

$$b = 2,$$

в «больших» группах

$$b + 1 = 3.$$

Номера «больших» катушечных групп в одном чередовании определяются рядом чисел

$$\frac{d}{c} = \frac{8}{3} = 2\frac{2}{3}; \quad 2\frac{d}{c} = 5\frac{1}{3}; \quad 3\frac{d}{c} = 8;$$

после округления дробных чисел до ближайших больших целых чисел: 3; 6; 8.

Число «чередований» всей обмотки

$$\frac{6p}{d} = \frac{6 \cdot 4}{8} = 3.$$

Распределение катушечных групп вдоль окружности якоря (цифра указывает число катушек в катушечной группе; чертой разделены «чередования»):

$$223 \ 223 \ 223 \mid 223 \ 223 \ 223 \mid 223 \ 223 \ 223.$$

9. Двухслойные волновые обмотки с дробным числом q . Применяются в основном для статоров мощных синхронных гидрогенераторов в тех случаях, когда по некоторым соображениям, главным образом экономическим и технологическим, они более целесообразны, чем петлевые обмотки с дробным числом q . При знаменателе дробности $d=2$ они применяются также для роторов асинхронных двигателей с фазным ротором, когда один штамп используется для изготовления листов сердечников двигателей с различными числами полюсов, при одном из которых число q оказывается дробным. Двухслойные волновые обмотки с дробным числом q выполняются стержневыми.

Условия симметрии и способы составления параллельных ветвей для волновой дробной обмотки такие же, как и для петлевой дробной обмотки (см. п. 8).

Схема обмотки может быть составлена при помощи звезды катушечных ЭДС. Первый частичный шаг y_1 не может быть равен τ . Его выбирают либо укороченным ($y_1 < \tau$), либо удлинненным ($y_1 > \tau$). В обмотках гидрогенераторов обычно отношения y_1/τ при $y_1 < \tau$ и $(2\tau - y_1)/\tau$ при $y_1 > \tau$ выбирают примерно равными 0,8.

Как и для петлевых дробных обмоток, разработаны различные способы составления схем волновых дробных обмоток без использования звезды векторов катушечных ЭДС.

23.23. ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В современных машинах постоянного тока применяются барабанные якорные обмотки, проводники которых лежат в пазах на внешней поверхности сердечника якоря. Обмотка образуется из ряда секций, концы которых присоединяются к коллекторным пластинам (рис. 23.21). Секция состоит из одного или

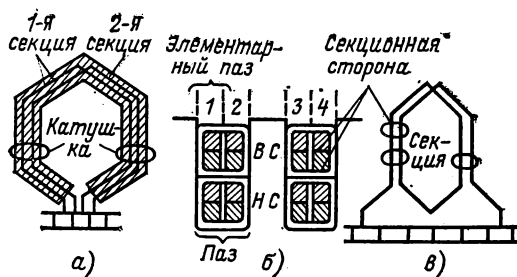


Рис. 23.21. а — катушка петлевой обмотки из одновитковых секций ($w_c=1$); б — образование элементарных пазов (1, 2, 3, 4... — номера элементарных пазов); в — двухвитковая секция обмотки ($w_c=2$)

нескольких последовательно соединенных витков (секцию, состоящую из нескольких витков, условно изображают в виде одновитковой секции). Стороны секции размещаются в пазах в два слоя. Одна из сторон секции лежит в верхнем слое (BC), другая — в нижнем (HC).

Несколько секций, имеющих общую изоляцию от стенок паза, образуют катушку обмотки.

При составлении схемы обмотки ширина секции и расстояние между секциями измеряются в элементарных пазах, причем под элементарным пазом условно понимается часть паза, содержащая две расположенные друг под другом секционные стороны. Обычно каждый паз содержит несколько элементарных пазов (на рис. 23.21 два элементарных паза).

Число элементарных пазов якоря Z_a равняется числу секций в обмотке S и числу коллекторных пластин K .

Якорная обмотка постоянного тока характеризуется:

числом пар полюсов p ;
числом пазов Z ;
числом секций (элементарных пазов) на паз

$$u_c = \frac{S}{Z} = \frac{K}{Z} = \frac{Z_a}{Z};$$

числом витков в секции w_c ;
числом эффективных проводов якоря
 $N = 2w_c u_c Z = 2w_c Z_a$;

числом эффективных проводов в пазу

$$u_{\Pi} = \frac{N}{Z} = 2w_c u_c;$$

числом элементарных проводников в пазу $c_a u_{\Pi}$, где c_a — число элементарных проводников в эффективном проводе;

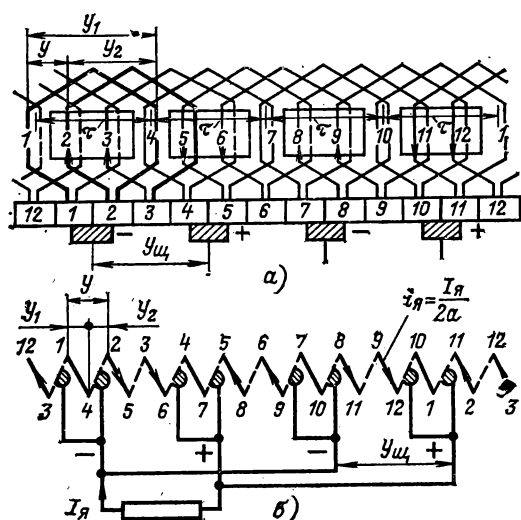


Рис. 23.22. а — схема простой петлевой обмотки ($Z_3 = 12$; $2p = 2a = 4$; $y_1 = 3$; $y_2 = 2$; $y_{12} = 3$); б — упрощенная схема той же обмотки

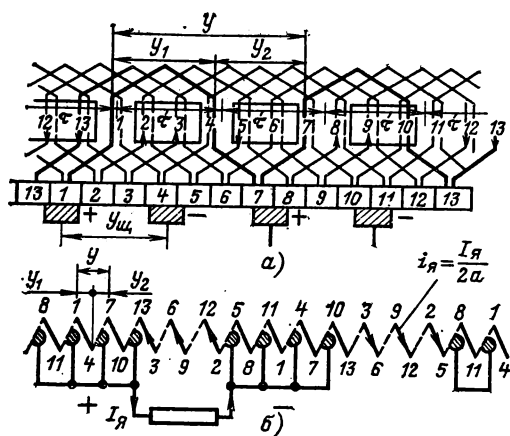


Рис. 23.23. а — схема простой волновой обмотки ($Z_3 = 13$; $2p = 4$; $2a = 2$; $y_1 = 3$; $y_2 = 3$; $y = 6$; $y_{12} = \tau = 3\frac{1}{4}$); б — упрощенная схема той же обмотки

первым шагом обмотки y_1 (рис. 23.22, 23.23), равным ширине секции или расстоянию между сторонами секции:

$$y_1 \approx \tau = Z_3 / 2p;$$

вторым шагом обмотки y_2 , равным расстоянию между конечной стороной одной секции и начальной стороной следующей секции при обходе по обмотке;

результующим шагом обмотки y , равным расстоянию между следующими друг за другом при обходе по обмотке секциями;

шагом по коллектору y_k , равным числу коллекторных делений (пластин), заключенных между началом и концом секции ($y_k = y$);

числом параллельных ветвей $2a$;

шагом секции по реальным пазам $y_{12} = y_1 / u_c$.

Обмотки с целым числом y_{12} называются равносекционными и могут быть выполнены

из одинаковых секций, объединенных в катушки из u_c секций. Ступенчатые обмотки с дробным y_{12} сложнее и дороже равносекционных. Они применяются только в крупных машинах и здесь не рассматриваются (см. [24.31, 24.33]).

По форме соединения секций якорные обмотки машин постоянного тока делятся на петлевые, волновые и комбинированные (лягушечьи).

а) Петлевые (параллельные) обмотки. Шаги петлевой обмотки связаны между собой следующими соотношениями:

$$y = y_k = y_1 - y_2; \quad y_1 = y_{12} u_c \approx Z_3 / 2p = \tau.$$

Результирующий шаг $y > 0$, если секции при обходе схемы обмотки смещаются вправо (см. рис. 23.22). Обмотка с $y > 0$ называется неперекрещенной. Перекрещенные обмотки с $y < 0$ имеют ограниченное применение, так как требуют повышенного расхода обмоточного провода.

Число элементарных пазов на паз обычно $u_c = 2, 3, 4, 5$.

Петлевые обмотки делятся на простые (одноходовые) и сложные (многоходовые).

В простой петлевой обмотке $y = \pm 1$. Схема простой петлевой обмотки приведена на рис. 23.22, а. При симметричных секциях щетки должны быть расположены против середин полюсов на расстоянии $y_m = K / 2p$ коллекторных пластин. На рис. 23.22, б показана упрощенная схема обмотки, на которой сплошными линиями показаны секции обмотки, а пунктирными линиями — коллекторные пластины, секции обозначены номерами элементарных пазов, в которых лежат их стороны. Номера коллекторных пластин соответствуют номерам тех секций, с началом которых они соединены (верхний ряд цифр).

Сложная петлевая обмотка ($y = \pm m$) состоит из m простых, причем секции и коллекторные пластины, принадлежащие простым обмоткам, чередуются. Схемы сложных петлевых обмоток приводятся в [23.10, 23.15].

В сложных петлевых обмотках ширина щеток должна быть не меньше m коллекторных пластин.

Особенностью петлевых обмоток является то, что число параллельных ветвей в них равно $2a = 2pm$. При $2a > 2$ обмотка должна иметь уравнивательные соединения (см. ниже).

б) Волновые (последовательные) обмотки. Шаги обмотки связаны уравнением

$$y = y_k = y_1 + y_2,$$

где $y_1 = y_{12} u_c$ выбирается по п. «а».

Через число элементарных пазов шаг обмотки выражается по формуле

$$y = (Z_3 \pm a) / p,$$

где a — число пар параллельных ветвей обмотки: $a = 1$ — в простой волновой обмотке; $a > 1$ — в сложной волновой обмотке. Число параллельных ветвей волновой обмотки не зависит от p .

Схемы простой волновой обмотки представлены на рис. 23.23. На упрощенной схеме обмотки, показанной на рис. 23.23, б, применены те же обозначения, что и на рис. 23.22, б (см. п. «а»). При $2a > 2$ обмотка должна иметь

уравнительные соединения (см. п. «г»). Схемы сложных волновых обмоток — см. [23.10, 23.15].

в) Комбинированные (лягушечьи) обмотки представляют собой сочетание петлевой и волновой обмоток (см. [24.33]). Петлевая и волновая обмотки, образующие эту обмотку, соединяются между собой параллельно. Существенное преимущество комбинированной обмотки состоит в том, что она может выполняться без уравнительных соединений [24.33]. Комбинированные обмотки применяются в машинах предельной мощности, а также в машинах с тяжелыми режимами работы.

г) Уравнительные соединения объединяют теоретически равнопотенциальные точки обмотки. Они необходимы в параллельных обмотках и сложных последовательных обмотках (при $2a > 2$) для избежания уравнительных токов, протекающих через щетки.

Шаг уравнительных соединений (расстояние между равнопотенциальными точками обмотки) выражается в элементарных пазах или коллекторных пластинах:

$$y_{ур} = \frac{Z_{\phi}}{p} = \frac{K}{p}.$$

Максимально возможное число уравнительных соединений

$$N_{ур} = K.$$

Практически с целью удешевления машины число уравнительных соединений делают в несколько раз меньшим по сравнению с максимально возможным:

$$N_{ур} = \frac{K}{(3 \div 5)}$$

в машинах средней мощности;

$$N_{ур} = (3 \div 5) a$$

в небольших машинах.

Уравнительные соединения размещаются либо со стороны коллектора, либо под лобовыми частями обмотки.

23.24. ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обмотки возбуждения, как правило, питаются постоянным током и предназначены для создания основного магнитного потока возбуждения в синхронных машинах и машинах постоянного тока. В соответствии с конструктивным исполнением магнитной системы обмотки возбуждения делятся на **явнополюсные** и **неявнополюсные**.

В **явнополюсных машинах** обмотка возбуждения образуется из $2p$ последовательно соединенных одинаковых катушек (рис. 23.24). Все витки каждой катушки охватывают один полюс (сосредоточенная обмотка). Соседние катушки включаются в схему обмотки встречно, т.е. так, что обтекаются током в противоположных направлениях. Все катушки обычно наматываются в одном направлении, например по часовой стрелке. Изменение направления тока в них достигается соединением конца верхнего витка (B) катушки с концом верхнего витка одной соседней катушки, а конца нижнего витка (H) — с концом нижне-

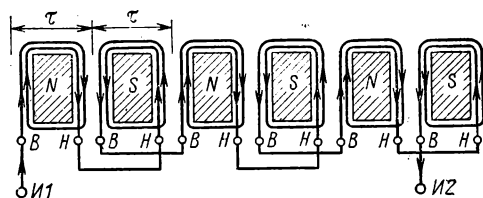


Рис. 23.24. Схема обмотки возбуждения явнополюсной синхронной машины

го витка другой соседней катушки. В явнополюсных машинах необходимая форма магнитного поля в зазоре создается с помощью придания определенной формы полюсному наконечнику.

Неявнополюсные машины характеризуются равномерным воздушным зазором. В этом случае удовлетворительная форма магнитного поля в зазоре достигается за счет применения распределенной обмотки возбуждения. Неявнополюсные обмотки возбуждения применяются для роторов турбогенераторов и располагаются в радиальных пазах, распределенных по наружной поверхности ротора (рис. 23.25).

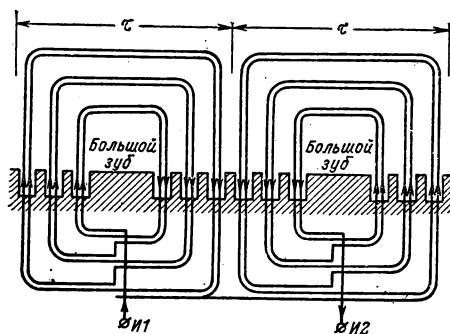


Рис. 23.25. Схема обмотки возбуждения неявнополюсной синхронной машины

Обмотанные пазы занимают, как правило, от $\frac{2}{3}$ до $\frac{3}{4}$ окружности бочки ротора. Необмотанная часть образует так называемый большой зубец.

Обычно неявнополюсная обмотка возбуждения выполняется концентрической (рис. 23.25). Обмотка образуется из последовательно соединенных одинаковых групп концентрических катушек различной ширины и длины (рис. 23.25). Магнитный поток возбуждения одной полярности создается катушками одной группы, распределенными в различных пазах. Катушка состоит из нескольких витков. Катушки одной группы включаются согласно. Число катушек в группе обычно 5—9. Соединения между катушками одной группы чаще выполняются из верхнего витка одной катушки к нижнему витку другой. Соединения между катушками двух групп (разных полюсов) выполняются по верхним виткам.

В последнее время для роторов турбогенераторов с непосредственным охлаждением применяют обмотки, которые по схеме напоминают статорные обмотки. Например, применяется роторная обмотка, по схеме повторяю-

шая петлевую статорную обмотку. Такие обмотки позволяют обеспечить лучший подвод и отвод воды [24.10].

23.25. КОРОТКОЗАМКНУТЫЕ ОБМОТКИ ТИПА БЕЛИЧЬЕЙ КЛЕТКИ

К короткозамкнутым обмоткам типа беличьей клетки относятся обмотки роторов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, демпферные (успокоительные) обмотки синхронных генераторов и пусковые обмотки синхронных двигателей.

Обмотка образуется из стержней, замкнутых с двух сторон короткозамыкающими кольцами.

В асинхронных машинах применяется равношаговая, или полная, беличья клетка, у которой расстояния между соседними стержнями одинаковые (рис. 23.26).

Беличьи клетки роторов асинхронных двигателей мощностью до 200 кВт (в отдельных случаях — до 400 кВт) выполняют литыми

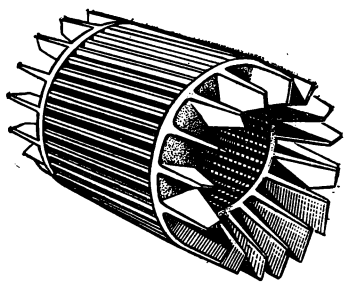


Рис. 23.26. Литая алюминиевая беличья клетка (заодно с клеткой отлиты вентиляционные лопатки, расположенные на короткозамыкающих кольцах)

алюминиевыми (рис. 23.26). Для заливки роторов электродвигателей общего применения используется чистый первичный алюминий. Химический состав отлитой беличьей клетки должен соответствовать составу первичного алюминия марки А5 или А6 (не более 0,5 % примесей).

Литые беличьи клетки технологичны и надежны. Методом литья изготавливают беличьи клетки диаметром до 550 и длиной до 700 мм. Стержни литых беличьих клеток располагаются в закрытых или полужакрытых пазах различной формы (глубокий с параллельными стенками, глубокий трапециевидный, клинообразный, лопаточный — рис. 23.27, а—г).

Короткозамкнутые обмотки крупных асинхронных двигателей (мощностью примерно свыше 200 кВт) и явнополюсных синхронных машин выполняются сварными, обычно из медных или латунных стержней и медных (латунных) короткозамыкающих колец или сегментов. Сварные короткозамкнутые обмотки асинхронных двигателей могут иметь стержни круглого, прямоугольного (глубокий паз, рис. 23.27, е) или специального (колбообразного, клинообразного, рис. 23.27, д, ж) профиля; применяются также двойные беличьи клетки, когда стержни обеих обмоток располагаются в полужакры-

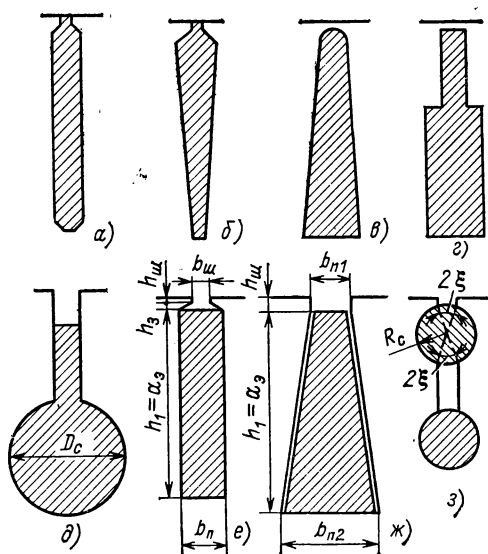


Рис. 23.27. Пазы и стержни короткозамкнутых обмоток асинхронных двигателей

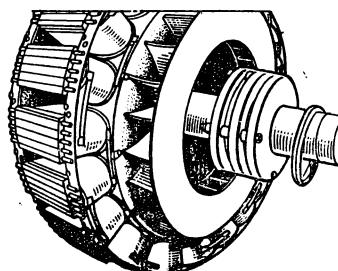


Рис. 23.28. Ротор синхронной машины с демпферной обмоткой

тых пазах на различной глубине (рис. 23.27, з). В асинхронных двигателях с двойной беличьей клеткой обычно стержни рабочей (внутренней) клетки — медные, пусковой (внешней) клетки — латунные (реже — бронзовые).

Демпферная обмотка синхронной машины может быть продольной или продольно-поперечной. В продольной обмотке накоротко замыкаются только стержни отдельных полюсов; в продольно-поперечной имеются переключки между полюсами, т. е. все демпферные стержни ротора замкнуты накоротко (рис. 23.28).

Стержни беличьих клеток синхронных машин имеют, как правило, круглое сечение и изготавливаются из меди или латуни. Стержни располагаются в пазах полюсных наконечников. Стержни каждого полюса припаивают с двух сторон к сегментам, сегменты соседних полюсов соединяют друг с другом болтами (рис. 23.28).

23.26. ЭДС, МДС И ПОЛЕ МНОГОФАЗНЫХ ОБМОТОК

1. Вращающееся магнитное поле. Симметричная многофазная обмотка переменного тока (см. § 23.22, п. 1) создает в воздушном зазоре электрической машины вращающееся магнитное поле. Токи в фазах обмотки взаимно сме-

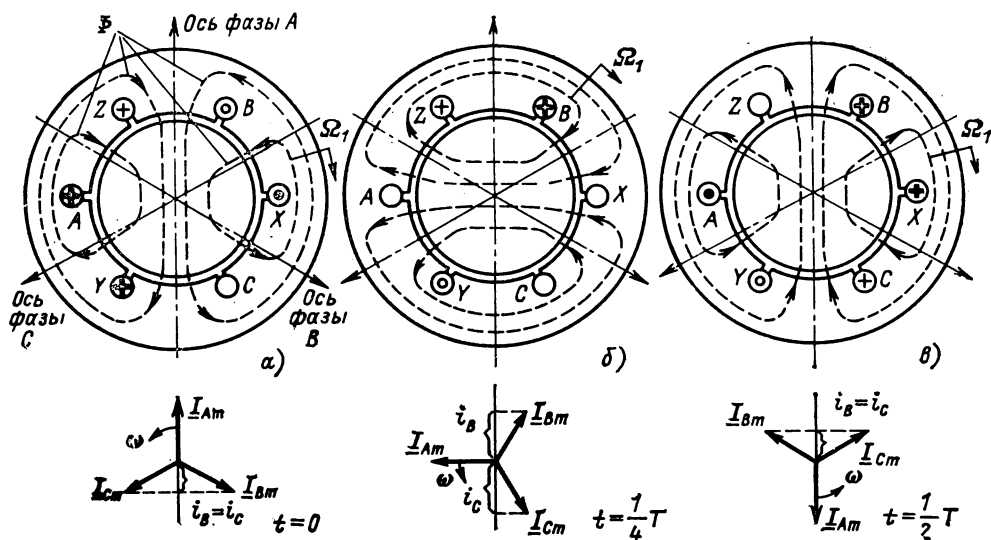


Рис. 23.29. Образование вращающегося магнитного поля

щены на электрический угол, равный углу сдвига фаз в пространстве ($\alpha = 360^\circ/m$). На свойстве якорных обмоток создавать вращающееся магнитное поле основан принцип действия всех многофазных электрических машин переменного тока.

На рис. 23.29 показана простейшая трехфазная ($m=3$) двухполюсная ($2p=2$) обмотка якоря, каждая фаза которой состоит из одного витка. Расстояние между проводниками, образующими один виток, равно полюсному делению. Взаимный сдвиг фаз обмотки равен $360/m = 120^\circ$. Примем за положительное направление токов направление в начальных проводниках фаз A, B, C за плоскость рисунка. На рис. 23.29, а–в показаны направления токов в фазах и магнитного поля в машине в различные моменты времени: $t=0$, когда $i_A = I_m$ и $i_B = i_C = -I_m/2$; $t=T/4$, когда $i_A = 0$; $i_B = i_C = I_m/2$; $t=T/2$, когда $i_A = -I_m$ и $i_B = i_C = -I_m/2$ (мгновенные значения токов фаз определяются как проекции амплитудных векторов токов фаз на вертикальную ось).

Из рис. 23.29 видно, что обмотка создает двухполюсный магнитный поток, вращающийся в пространстве в направлении чередования фаз (A–B–C). За один период T изменения тока частотой f поле поворачивается на электрический угол 360° , соответствующий двум полюсным делениям. Следовательно, частота вращения поля n , об/с = f , Гц.

2р-полюсная обмотка создает 2р-полюсный магнитный поток, вращающийся в пространстве с частотой в p раз меньшей, чем поток двухполюсной обмотки при одинаковой частоте тока.

В общем случае частота вращения магнитного поля $n = f/p$, об/с, или $n = 60f/p$, об/мин, а угловая скорость $\Omega = 2\pi n = 2\pi f/p$, рад/с.

2. Электродвижущая сила фазы обмотки (действующее значение) индуцируемая вращающейся основной гармонической индукции магнитного поля в зазоре,

$$E = \pi \sqrt{2} f k_w k_{ск} \Phi,$$

где f — частота основной гармонической ЭДС; k_w , $k_{ск}$ — обмоточный коэффициент и коэффициент скоса пазов для основной гармонической поля (см. п. 4); ω — число последовательно соединенных витков каждой параллельной ветви фазы; Φ — магнитный поток, определяемый по основной гармонической индукции:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \tau l_\delta B_{\delta 1},$$

где $B_{\delta 1}$ — амплитуда основной гармонической индукции в зазоре.

Электродвижущая сила фазы обмотки, индуцируемая вращающейся v -й гармонической индукции магнитного поля,¹

$$E_v = \pi \sqrt{2} f_v k_{wv} k_{скv} \omega \Phi_v,$$

где f_v — частота ЭДС; k_{wv} , $k_{скv}$ — обмоточный коэффициент и коэффициент скоса для v -й гармонической (см. п. 4);

$$\Phi_v = \frac{2}{\pi} \tau_v l_\delta B_{\delta v};$$

τ_v — полюсное деление v -й гармонической; $B_{\delta v}$ — амплитуда v -й гармонической индукции в воздушном зазоре.

3. Магнитодвижущая сила многофазной обмотки. Амплитуда v -й гармонической МДС, созданной m -фазной симметричной обмоткой,

$$F_v = \frac{m \sqrt{2}}{\pi} \frac{I \omega k_{wv} v_{осн}}{v p},$$

¹ Порядок пространственных гармонических индукции магнитного поля и МДС определяется по отношению к основной гармонической в машинах с целым числом q , т.е. по отношению к гармонической с периодом 2τ (порядок основной гармонической $v_{осн}=1$), в машинах с дробным числом q — по отношению к гармонической, период которой соответствует «первоначальной обмотке» (см. § 23.22, п. 8) и равен для двухслойной обмотки $d\tau$ при четном числе d и $2d\tau$ при нечетном числе d (порядок основной гармонической $v_{осн}=p'$).

где I — действующее значение тока фазы; $v_{осн}=p'$ при дробном числе q ; $v_{осн}=1$ при целом q .

Порядок гармонических МДС, создаваемых токами прямой последовательности: $v=2mk\pm 1$ — обмотки с целым числом q и $v=2mk\pm d$ — обмотки с дробным числом q (двухслойные) при нечетном числе d ; $v=mk\pm d/2$ при четном числе d , где k принимает такие положительные и отрицательные значения, включая нуль, при которых число v остается положительным; знаку плюс соответствуют согласно вращающиеся (прямые), а знаку минус — обратно вращающиеся (обратные) гармонические по отношению к направлению вращения основной гармонической.

Большое влияние на работу электрической машины оказывают зубцовые гармонические МДС, обмоточные коэффициенты которых равны обмоточному коэффициенту основной гармонической МДС. Порядок зубцовых гармонических для обмоток:

$$\text{с целым } q \quad v_z = 2mqk \pm 1 = k \frac{Z}{p} \pm 1;$$

$$\text{с дробным } q \quad v_z = kZ' \pm p',$$

где $k=1, 2, 3 \dots$

При увеличении q порядок зубцовых гармонических увеличивается и, следовательно, уменьшается их амплитуда по отношению к амплитуде основной гармонической МДС.

Полная МДС обмотки при симметричной нагрузке

$$F(t, \alpha) = \sum_v F_v \cos \left(\omega t \mp p \frac{v}{v_{осн}} \alpha \right),$$

где α — угловая координата точки в зазоре; знак минус относится к прямым гармоникам МДС, знак плюс — к обратным гармоникам МДС.

4. Обмоточные коэффициенты. а) Коэффициент распределения обмотки для v -й гармонической индукции магнитного поля или МДС (обмотка, фазная зона которой занимает электрический угол $360^\circ/2m$):

при целом q

$$k_{pv} = \frac{\sin \frac{v\pi}{2m}}{q \sin \frac{v\pi}{2mq}};$$

при дробном q (трехфазная двухслойная обмотка с 60-градусной фазной зоной) и нечетном числе d

$$k_{pv} = \frac{\sin \frac{vr\pi}{6}}{q_d \sin \frac{vr\pi}{6q_d}};$$

при четном числе d

$$k_{pv} = \frac{\cos \frac{vR\pi}{3}}{q_d \cos \frac{vR\pi}{3q_d}};$$

где $q_d = bd + c$ (см. § 23.22, п. 8); $r = (6Lq_d + 1)/d$; $R = (3Lq_d + 1)/d$; L — такое наименьшее целое число, при котором $r(R)$ также целое число.

Примечание. Для основной гармонической дробной обмотки коэффициент распределения может быть рассчитан по формуле для коэффициента распределения обмотки с целым числом q , если принять $v=1$ и $q=q_d$.

б) Коэффициент укорочения шага для v -й гармонической индукции магнитного поля или МДС

$$k_{yv} = \sin \frac{v}{v_{осн}} \frac{y}{\tau} \frac{\pi}{2},$$

где $v_{осн}$ — порядок основной гармонической (см. п. 3).

Для волновых обмоток вместо y следует подставлять y_1 (см. § 23.22, п. 9).

Для однослойных обмоток со сплошной фазной зоной $k_{yv} = 1$.

в) Обмоточный коэффициент для v -й гармонической индукции магнитного поля или МДС

$$k_{wv} = k_{pv} k_{yv}.$$

г) Коэффициент скоса пазов для v -й гармонической индукции магнитного поля

$$k_{скv} = \frac{\sin \frac{v}{v_{осн}} \frac{b_{ск}}{\tau} \frac{\pi}{2}}{\frac{v}{v_{осн}} \frac{b_{ск}}{\tau} \frac{\pi}{2}},$$

где $b_{ск}$ — скос (расстояние между входом и выходом паза по отношению к оси основной гармонической поля, измеренное на дуге поверхности сердечника); $v_{осн}$ — см. п. 3.

Коэффициент $k_{скv} \neq 1$ только в случае, если пазы скошены относительно оси магнитного поля.

5. ЭДС и МДС равношаговой беличьей клетки. Расчетное число фаз обмотки $m_2 = Z_2$.

Электродвижущая сила фазы (полувитка), индуцируемая v -й гармонической магнитного поля,

$$E_{kv} = \frac{\pi \sqrt{2}}{2} f_v k_{скv} \Phi_v,$$

где f_v — частота ЭДС, индуцируемой в беличьей клетке; Φ_v — v -я гармоническая магнитного потока; $k_{скv}$ — коэффициент скоса пазов беличьей клетки для v -й гармонической.

Амплитуда гармонической МДС с μ парами полюсов беличьей клетки, обусловленная токами, индуцированными в ней гармонической магнитной индукции с v парами полюсов, равна:

$$F_{kv\mu} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{Z_2}{\mu} I_k k_{yv} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \frac{Z_2}{\mu} I_c,$$

где I_c и I_k — ток стержня и ток контура, образованного двумя соседними стержнями, введенные v -й гармонической индукции магнитного поля (рис. 23.30); $k_{yv} = \sin \pi v / Z_2$.

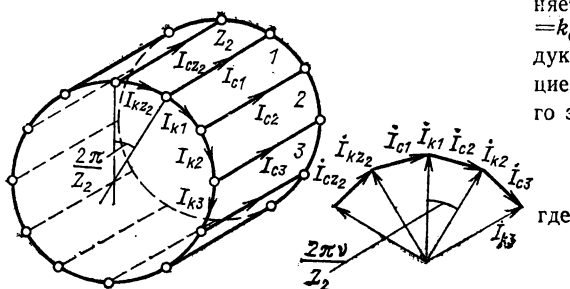


Рис. 23.30. К расчету ЭДС и МДС равношаговой беличьей клетки

Токи клетки, наведенные гармонической индукции с v парами полюсов, создают гармонические МДС с числом пар полюсов

$$\mu = \pm v + kZ_2,$$

где $k=0, 1, 2, 3 \dots$; знаку плюс (минус) перед v соответствует гармоническая МДС, вращающаяся согласно (встречно) с v -й гармонической индукции.

6. Магнитное поле в воздушном зазоре. При равномерном воздушном зазоре (раскрытия пазов бесконечно узкие, а токи расположены в точках поверхности сердечника на осях пазов) распределение индукции в воздушном зазоре повторяет распределение МДС так, что каждая гармоническая МДС создает только одну гармоническую индукцию магнитного поля с тем же числом периодов:

$$B_{\delta v} = \mu_0 F_v / \delta,$$

где $1/\delta = \Lambda$ — удельная магнитная проводимость воздушного зазора.

Реальные пазы (рис. 23.31, а) искажают форму магнитного поля. При постоянной МДС и наличии пазов на одном из сердечников кривая индукции имеет провал на оси паза (рис. 23.31, б). Для упрощения ряда расчетов реальный неравномерный воздушный зазор δ заме-

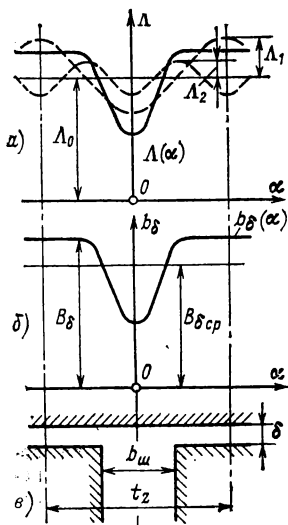


Рис. 23.31. Магнитная индукция в воздушном зазоре при односторонней зубчатости

няется равномерным расчетным зазором $\delta' = k_{\delta} \delta$, индукция в котором равна средней индукции $B_{\delta \text{ср}}$ в неравномерном зазоре. Коэффициент k_{δ} называется коэффициентом воздушного зазора (коэффициентом Картера), он равен:

$$k_{\delta} = \frac{t_z}{t_z - \gamma \delta},$$

где

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left[\frac{b_{\text{ш}}}{2\delta} \arctg \frac{b_{\text{ш}}}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{\text{ш}}}{2\delta} \right)^2} \right].$$

Приближенно γ можно рассчитать по формуле

$$\gamma = \frac{(b_{\text{ш}}/\delta)^2}{5 + b_{\text{ш}}/\delta}.$$

Распределение магнитной индукции $b_{\delta}(\alpha)$ в воздушном зазоре при бесконечно большой магнитной проницаемости стали можно найти с достаточной для практических целей точностью, умножив МДС $F(\alpha)$ (см. п. 3) обмотки, возбуждающей магнитное поле, на удельную магнитную проводимость воздушного зазора $\Lambda(\alpha)$ (рис. 23.31, а):

$$b_{\delta}(\alpha) = \mu_0 F(\alpha) \Lambda(\alpha).$$

Кривая $\Lambda(\alpha)$ является периодической функцией с периодом, равным зубцовому делению t_z . При расположении начала координат на оси паза и числе зубцов сердечника Z

$$\Lambda(\alpha) = \Lambda_0 - \sum_{k=1}^{\infty} \Lambda_k \cos kZ\alpha,$$

где $\Lambda_0 = 1/k_{\delta} \delta$ — постоянная составляющая удельной проводимости воздушного зазора; Λ_k — амплитуда k -й гармонической составляющей удельной проводимости:

$$\Lambda_k = \frac{\beta}{\delta} \eta_k,$$

$\beta = f(b_{\text{ш}}/\delta)$ — по рис. 23.32, а; $\eta_k = f(b_{\text{ш}}/t_z)$ — по рис. 23.32, б (для $k=1, 2, 3$).

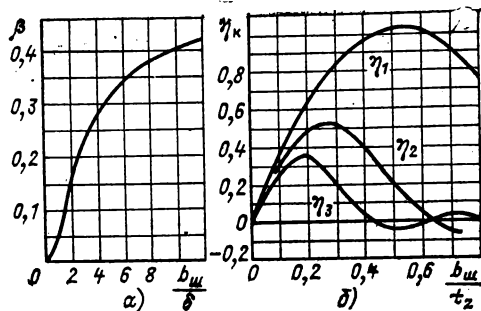


Рис. 23.32. К расчету магнитной проводимости воздушного зазора

При наличии пазов на статоре и роторе удельная магнитная проводимость воздушного зазора приближенно может быть рассчитана по формуле

$$\Lambda = \delta \Lambda_1 \Lambda_2,$$

где $\Lambda_1 (\Lambda_2)$ — удельная проводимость воздушного зазора, образованного зубчатым статором (ротором) и гладким ротором (статором) с минимальным расстоянием между ними δ .

Коэффициент воздушного зазора при двусторонней зубчатости

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2},$$

где $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 2}$ — коэффициенты воздушного зазора статора и ротора, каждый из которых рассчитывается в предположении, что поверхность противолежащего сердечника — гладкая.

Более точно рассчитать амплитуду ν -й гармонической индукции в воздушном зазоре при односторонней зубчатости можно с помощью коэффициента влияния пазов C_ν , который учитывает реальный характер магнитного поля в зоне пазов с током и влияние всех гармонических МДС на создание ν гармонической поля

$$B_\nu = \frac{\mu_0}{\delta'} F_\nu C_\nu,$$

где зазор $\delta' = k_{\delta 2} \delta$ берется с учетом зубчатости противолежащего сердечника.

Для гармонических, число периодов которых мало по сравнению с числом пазов $\rho\nu/\nu_{\text{осн}} \ll Z$, коэффициент C_ν

$$C_\nu = \frac{1}{k_{\delta 1}} \left\{ 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\pi \rho \nu}{Z \nu_{\text{осн}}} \right)^2 [k_{\delta 1} - 1 - 3k_{\delta 1} s_\Pi] \right\} \approx \frac{1}{k_{\delta 1}},$$

где $k_{\delta 1}$ — коэффициент Картера, рассчитанный при зазоре δ' ;

$$s_\Pi = \frac{1}{3} \left(\frac{b_\Pi}{t_z} \right)^2 \varphi \left(\frac{b_\Pi}{\delta'} \right);$$

$$\varphi \left(\frac{b_\Pi}{\delta'} \right) \approx 2 \left(\frac{\delta'}{b_\Pi} \right)^2 + 1,5 - \frac{1}{1 + 0,08 b_\Pi / \delta'}.$$

В общем случае

$$C_\nu = 1 - \left(\frac{A_\epsilon}{\operatorname{tg} \frac{\pi \rho \nu}{Z \nu_{\text{осн}}}} + B_\epsilon \right),$$

где значения коэффициентов A_ϵ и B_ϵ в зависимости от ϵ и отношения b_Π/δ' приведены на рис. 23.33;

$$\epsilon = \frac{\pi \rho \nu}{Z \nu_{\text{осн}}} \frac{b_\Pi}{t_z}.$$

7. Магнитное поле якорных обмоток синхронных явнополюсных машин. Магнитное поле в воздушном зазоре синхронной явнополюсной машины, создаваемое многофазной обмоткой якоря, очень сложно и существенно зависит от положения ротора (от сдвига между осью полюса и осью МДС обмотки якоря). При анализе процессов в обычных синхронных машинах с большим числом зубцов Z ($q > 1$)

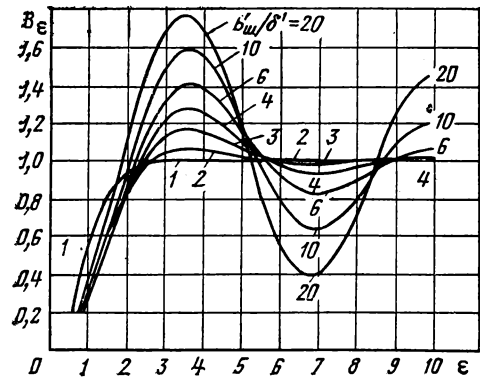
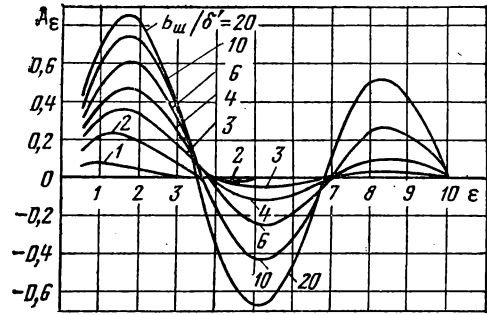


Рис. 23.33. К расчёту C_ν

ограничиваются рассмотрением поля основной гармонической МДС обмотки якоря F_a .

При допущении о бесконечно большой проницаемости стальных участков магнитной цепи поле в машине можно представить как сумму двух более простых полей от продольной F_d и поперечной F_q составляющих основной гармонической МДС обмотки якоря (см. § 24.20, рис. 24.52). Характер каждого из этих полей зависит только от конфигурации полюсного наконечника [относительной полюсной дуги $\alpha = b_p/\tau$; коэффициента неравномерности зазора под полюсом $\xi = \delta_{\max}/\delta$ (см. рис. 23.36); относительного максимального зазора $\epsilon = \delta_{\max}/\tau$] и не зависит от положения ротора.

Распределение индукции магнитных полей по продольной и поперечной осям характеризуется коэффициентами формы, полученными путем критериальной обработки результатов численного расчета этих полей [23.14].

Коэффициент формы ν -й гармонической индукции поля по продольной оси равен отношению амплитуды ν -й гармонической индукции от продольной МДС B_{adv} к амплитуде индукции от этой МДС $B_{ad} = \mu_0 F_d/\delta$, определенной при равномерном зазоре:

$$k_{dv} = B_{adv}/B_{ad}.$$

Коэффициент формы ν -й гармонической индукции поля по поперечной оси равен отношению амплитуды ν -й гармонической индукции от поперечной МДС B_{aqv} к амплитуде индукции от этой МДС $B_{aq} = \mu_0 F_q/\delta$, определенной при равномерном зазоре:

$$k_{qv} = B_{aqv}/B_{aq}.$$

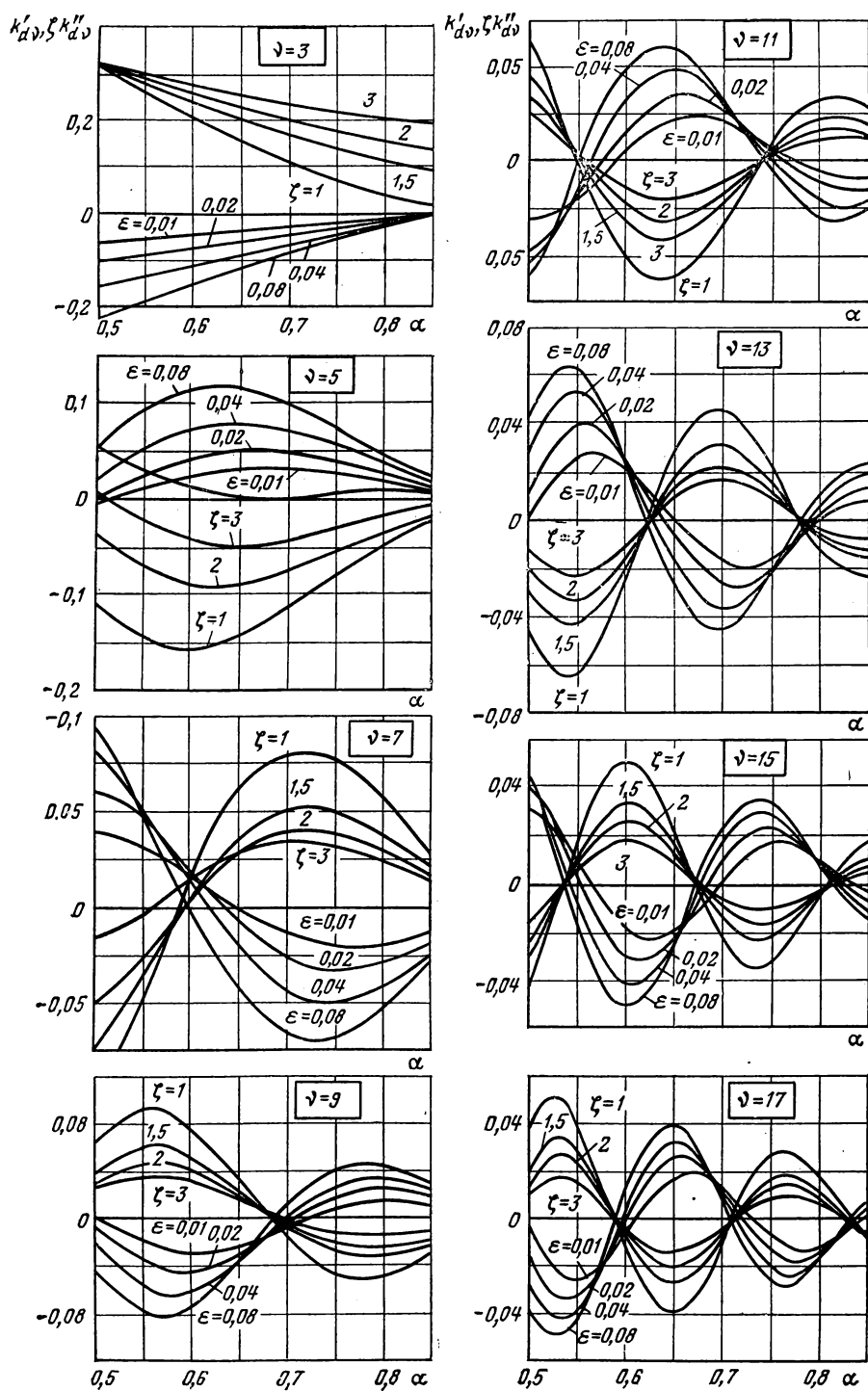


Рис. 23.34. Коэффициенты, определяющие высшие гармонические поля якоря по продольной оси $k_{dv} = k'_{dv} + k''_{dv}$

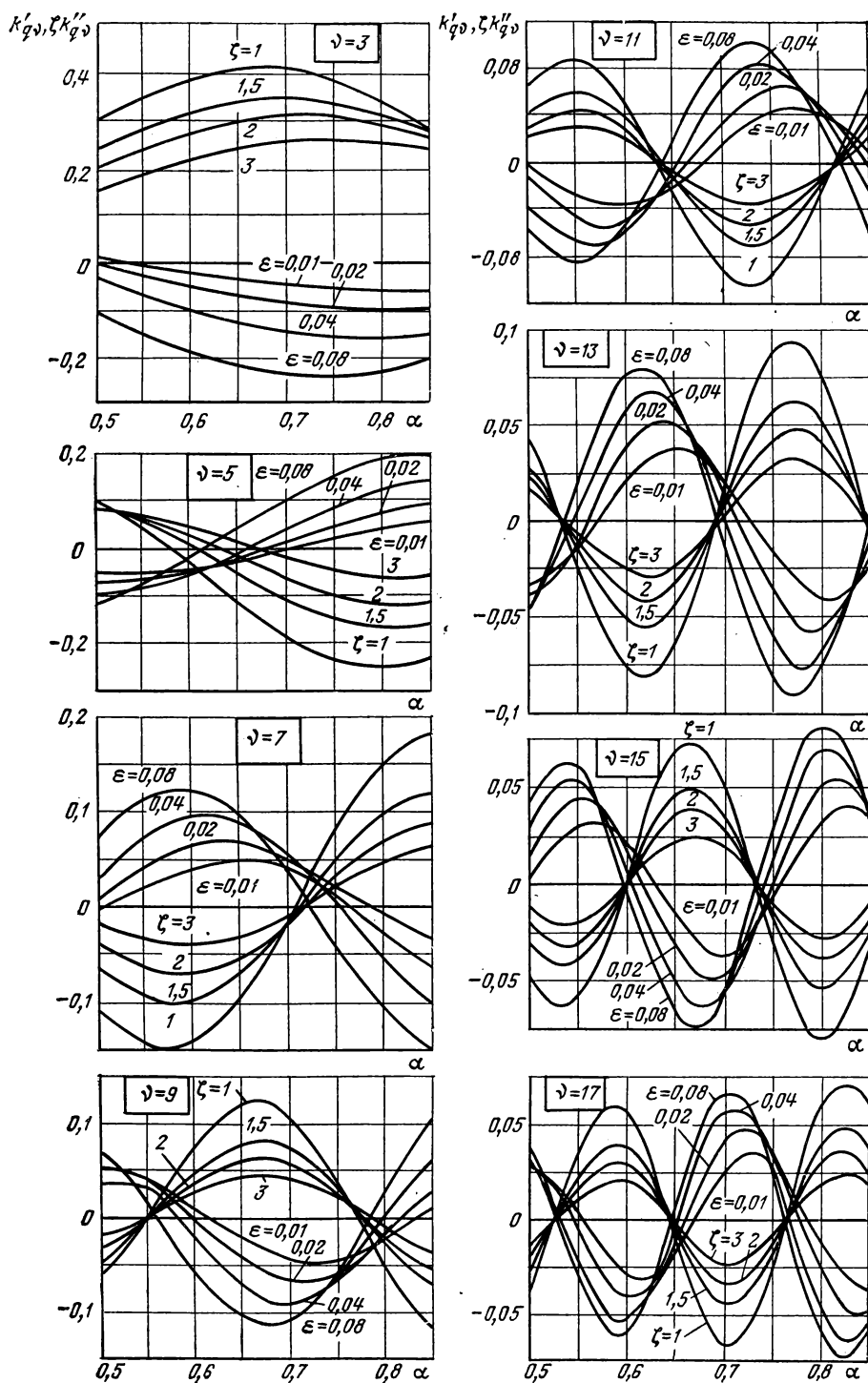


Рис. 23.35. Коэффициенты, определяющие высшие гармонические по поперечной оси

$$k_{qv} = k_{qv}^{\zeta} + k_{qv}^{\eta}$$

Коэффициенты формы для высших гармонических индукции представляются в виде суммы двух составляющих $k_{d(q)v} = k'_{d(q)v} + k''_{d(q)v}$.

Коэффициенты $k'_{d(q)v}$ и $k''_{d(q)v}$ в зависимости от α , ζ и ϵ определяются по рис. 23.34 и рис. 23.35. Для основной гармонической поля коэффициенты k_d и k_q рассчитываются в § 24.20.

Примечание. На рис. 23.34 и 23.35 даны значения $\zeta k'_{dv}$ и $\zeta k''_{qv}$ в зависимости от α и ϵ , а k'_{dv} и k''_{qv} в зависимости от α и ζ .

23.27. МДС И ПОЛЕ ОБМОТОК ВОЗБУЖДЕНИЯ

1. Явнополюсные машины имеют на роторе сосредоточенную обмотку возбуждения (см. § 23.24), которая создает МДС прямоугольной формы (рис. 23.36). На протяжении

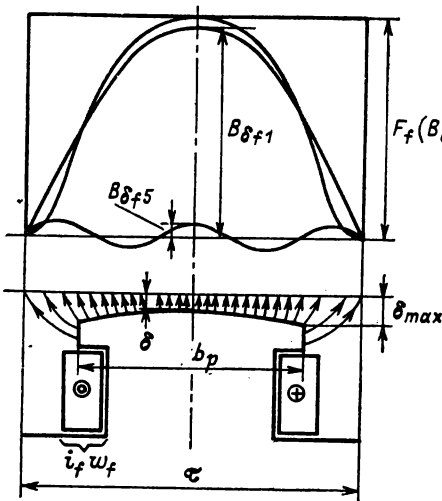


Рис. 23.36. Поле обмотки возбуждения явнополюсной машины

полюсного деления МДС остается постоянной и равной $F_f = i_f \omega_f$ (i_f , ω_f — ток и число витков в обмотке возбуждения), а на оси межполюсного пространства меняет полярность. Распределение индукции магнитного поля в зазоре зависит от воздушного зазора и геометрии полюсного наконечника (относительной полюсной дуги $\alpha = b_p/\tau$; коэффициента неравномерности воздушного зазора $\zeta = \delta_{max}/\delta$; относительного зазора $\epsilon = \delta_{max}/\tau$).

Максимальная индукция на оси полюса (см. рис. 23.36) без учета насыщения

$$B_{\delta f} = \mu_0 F_f / \delta.$$

Амплитуды гармонических индукций ($B_{\delta fv}$) определяются с помощью коэффициентов формы поля возбуждения:

$$B_{\delta fv} = k_{fv} B_{\delta f}.$$

Коэффициенты формы поля возбуждения равны сумме двух составляющих $k_{fv} = k'_{fv} + k''_{fv}$ и определяются в зависимости от α , ζ

и ϵ [23.14]. Для высших гармонических k'_{fv} и k''_{fv} определяются из кривых рис. 23.37 (на рисунке даны значения $\zeta k'_{fv}$ в зависимости от α и ϵ и k'_{fv} — в зависимости от α и ζ). Для основной гармонической коэффициент формы поля возбуждения определяется по кривым, приведенным в § 24.20.

2. Неявнополюсные машины. Благоприятная форма кривой индукции поля, созданного распределенной обмоткой возбуждения, достигается за счет выбора числа обмотанных пазов на полюс q и отношения обмотанной части ротора к полной окружности ротора γ (рис. 23.38). Кривая МДС имеет ступенчатую форму. Максимальная МДС равна $F_f = i_f \omega_f$ (ω_f — число витков на полюс).

Амплитуды гармонических МДС определяются по формуле

$$F_{fv} = \frac{4k_{p fv}}{\pi v} i_f \omega_f,$$

$$\sin \frac{\gamma \pi}{2} v$$

где $k_{p fv} = \frac{\sin \frac{\gamma \pi}{2} v}{q \sin \frac{\gamma \pi}{2q} v}$ — коэффициент распре-

деления v -й гармонической.

В неявнополюсных машинах обычно пазы не оказывают большого влияния на поле в зазоре, который можно принять равномерным и равным δ (рис. 23.38). Поэтому (без учета насыщения) кривая индукции по форме повторяет кривую МДС, а амплитуды гармонических индукций равны:

$$B_{\delta fv} = \mu_0 F_{fv} / \delta.$$

На рис. 23.38 изображены 1-я и 5-я гармонические МДС и индукции. Коэффициент формы поля возбуждения для v -й гармонической $k_{fv} = B_{\delta fv} / B_{\delta f}$, причем максимальная индукция на оси полюса $B_{\delta f} = \mu_0 F_f / \delta$.

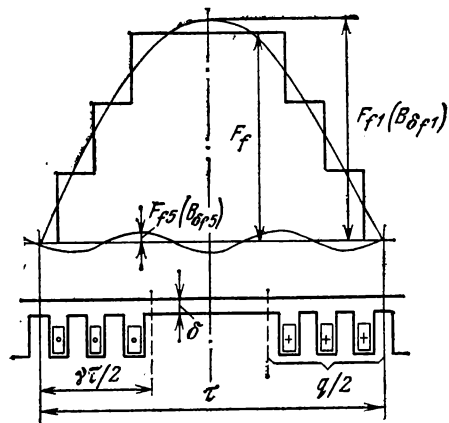


Рис. 23.38. Поле обмотки возбуждения неявнополюсной машины

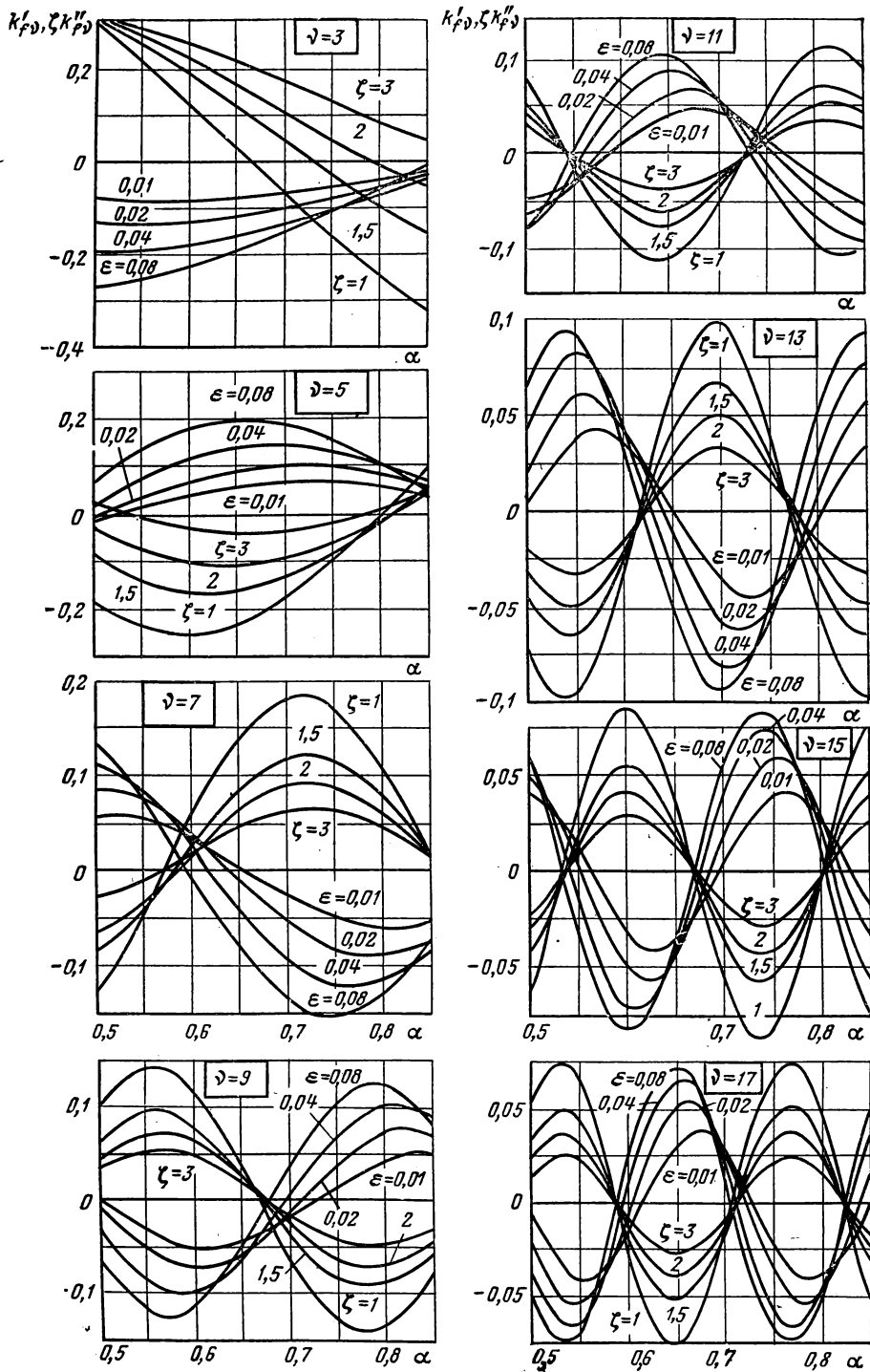


Рис. 23.37. Коэффициенты, определяющие высшие гармонические поля обмотки возбуждения $k_{fv} = k'_{fv} + k''_{fv}$

23.28. АКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

1. Якорные обмотки. Основным проводниковым материалом для якорных обмоток служит проволока медная мягкая круглого или прямоугольного сечения, отличающаяся малым содержанием примесей. Ограниченное, но расширяющееся применение в качестве проводникового материала находит алюминий.

Активное сопротивление фазы обмотки при температуре t

$$r = k_r \rho_t L / S a,$$

где $L = 2\omega l_{cp}$ — длина последовательно включенных проводников фазы; l_{cp} — средняя длина полувитка; S — сечение эффективного проводника; a — число параллельных ветвей; $\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20)]$ — удельное сопротивление проводника при температуре t ; для меди $\rho_{20} \approx 10^{-6}/56$ Ом·м; α — температурный коэффициент сопротивления; для меди и алюминия $\alpha \approx 0,004$ °C⁻¹; k_r — коэффициент увеличения сопротивления обмотки вследствие поверхностного эффекта, вызываемого полями рассеяния (коэффициент Фильда).

За расчетную рабочую температуру принимается температура, указанная в § 23.8, п. 22.

Средняя длина полувитка

$$l_{cp} = l_1 + l_n,$$

где l_1 — длина сердечника; l_n — длина лобовой части.

Приближенно длина лобовой части l_n может быть выражена через полюсное деление: при однослойной концентрической трехплоскостной и двухслойной (с полным шагом) обмотках для статора $l_n \approx 1,8 \tau$, для ротора $l_n \approx 1,4 \tau$.

Для всыпных обмоток из проводов круглого сечения, уложенных в полузакрытые пазы, $k_r \approx 1,03 \div 1,05$.

Коэффициент k_r жестких обмоток, выполненных из изолированных элементарных проводов прямоугольного сечения, может достигать значений $k_r \approx 1,1 \div 1,2$ и более (до 1,7 в турбогенераторах) и определяется следующим образом.

а) Коэффициент k_r стержневых обмоток с полной транспозицией сплошных элементарных

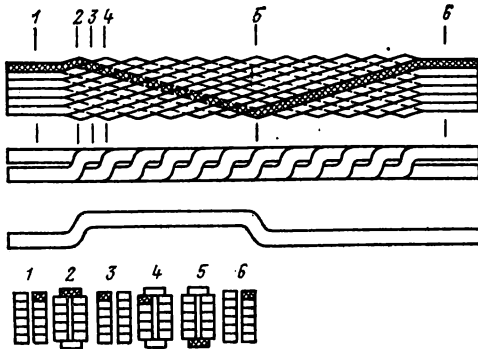


Рис. 23.39. Стержень с транспозицией элементарных проводников

проводников на длине активной стали (рис. 23.39) равен (среднее значение для всех проводников при допущении, что поверхностный эффект проявляется только на активной длине проводников):

$$k_r = 1 + \frac{l_\delta}{l_{cp}} (k_{ra} - 1),$$

где

$$k_{ra} = \varphi(\xi) + \frac{m_a^2 - 1}{3} \psi(\xi)$$

— коэффициент увеличения сопротивления активной части проводника;

$$\xi = \alpha a_a = a_a \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2 \rho_t} \frac{b_\Sigma}{b_n}}$$

— приведенная высота проводника (безразмерная величина); для медных проводников при $f = 50$ Гц и $b_\Sigma \approx b_n$ высота ξ примерно равна высоте проводника a_a , выраженной в сантиметрах ($\alpha \approx 100$); α — коэффициент, м⁻¹; a_a — высота элементарного проводника (см. рис. 23.15, $a-b$); $b_\Sigma = n_a b_a$ — общая ширина меди в пазу; b_n — ширина паза; m_a, n_a — число элементарных проводников по высоте и ширине паза; $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ — функции Эмде — по рис. 23.40.

Обычно $a_a < 1,0$ см, при этом $\xi < 1$;

$$\varphi(\xi) \approx 1 + \frac{4}{45} \xi^4; \quad \psi(\xi) \approx \frac{1}{3} \xi^4; \quad k_{ra} \approx 1 + \frac{m_a^2 - 0,2}{9} \xi^4.$$

б) Коэффициент k_r катушечных обмоток (без транспозиции в пазовой части) определяется с учетом увеличения сопротивления между отдельными элементарными проводниками вследствие различия их индуктивных сопротивлений:

$$k_r = 1 + \frac{l_\delta}{l_{cp}} (k_{ra} - 1) + \gamma k_{ri},$$

где k_{ri} — коэффициент увеличения сопротивления от уравнивающих токов; γ — коэффициент, учитывающий влияние конструктивных особенностей катушки (число витков, сокращение шага, наличие транспозиции в лобовой части).

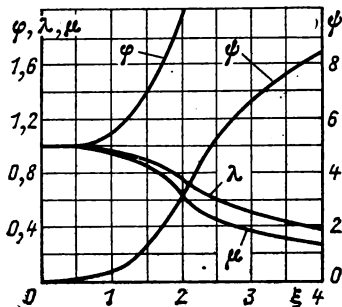


Рис. 23.40. Функции $\varphi(\xi)$, $\psi(\xi)$, $\lambda(\xi)$, $\mu(\xi)$

Т а б л и ц а 23.13. Коэффициент γ

Число витков в катушке	Относительный шаг $\beta = y/\tau$	
	0,8	0,9
2	0,08	0,08
3	0,11	0,08
4	0,13	0,08
6	0,27	0,20

Для обмотки из медных проводников

$$k_{ri} = \frac{19}{u_n^2} \left(\frac{2l_\delta}{l_{cp}} \right)^2 \left(\frac{b_\Sigma}{b_n} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^2 (a_\Sigma m_\Sigma)^4 \cdot 10^5,$$

где u_n — число эффективных проводников в пазу (под «эффективным проводником» понимается проводник, по которому протекает полный ток одной параллельной ветви обмотки).

Коэффициент γ для катушек с транспозицией в лобовой части определяется по табл. 23.13, для катушек без такой транспозиции $\gamma = 1$.

Более точно k_r катушечных обмоток рассчитывается в [23.17].

При определенной, «критической» высоте проводника обмотка имеет наименьшее сопротивление переменному току. Увеличение высоты проводника сверх «критической» приводит, несмотря на увеличение его сечения, к увеличению сопротивления проводника из-за более сильного проявления эффекта вытеснения тока. Для обычно применяемых статорных обмоток с $\xi < 1$ среднее значение коэффициента (для всех проводников пазы) $k_{ra} \approx 1,33$. В таких оптимально спроектированных обмотках увеличение сопротивления из-за вытеснения тока не должно превышать 33 % сопротивления постоянному току.

Высота элементарного проводника a_Σ , при которой $k_{ra} < 1,2$ (частота 50 Гц), для различных значений высоты h_1 , меди в пазу

h_1 , см	3	5	10	15
a_Σ , см	0,8	0,47	0,24	0,16

Эффект вытеснения тока в разной степени проявляется в верхних и нижних стержнях (катушечных сторонах) двухслойной обмотки, уложенной в пазы: коэффициент k_{ra} для верхнего стержня может в несколько раз превосходить коэффициент k_{ra} для нижнего стержня. Поэтому потери в верхнем стержне и его нагрев могут быть значительно больше потерь и нагрева нижнего стержня.

Допущение о проявлении вытеснения тока только на активной длине проводника, отраженное в выражениях для k_r , справедливо лишь при умеренных линейных нагрузках. При $A > 7 \cdot 10^4$ А/м можно приближенно считать, что вытеснение тока в активных и лобовых частях стержня происходит одинаковым образом, и тогда следует полагать $k_r = k_{ra}$.

При $\xi < 1$ для обмоток с полыми проводниками (ориентировочно)

$$k_{ra} = 1 + 107 \left(\frac{f}{50} \right)^2 \left(\frac{b_i}{b_n} \right)^2 m^2 a^4 \frac{S}{ab} \times \\ \times \left(1 - \frac{a_k^3}{a^3} \frac{b_k}{b} \right) \cdot 10^5;$$

для обмоток с полыми и сплошными проводниками (см. рис. 24.38)

$$k_{ra} = 1 + 107 \left(\frac{f}{50} \right)^2 \left(\frac{b_i}{b_n} \right)^2 (ma + m_c a_c)^2 \times \\ \times \left[a^2 \frac{ma}{h_1} \frac{S}{ab} \left(1 - \frac{a_k^3 b_k}{a^3 b} \right) + \right. \\ \left. + a_c^2 \frac{m_c a_c}{h_1} \right] \cdot 10^5,$$

где m , m_c — числа полых и сплошных проводников, расположенных в пазу друг под другом; a , b — высота и ширина полого проводника; a_c — высота сплошного проводника; a_k , b_k — высота и ширина канала в полом проводнике; S — площадь сечения меди полого проводника; b_1 , h_1 — ширина и высота меди в пазу.

Рекомендации по выбору критической высоты полого проводника приводятся в [24.10].

2. **Равношаговая беличья клетка** является многофазной обмоткой с числом фаз, равным числу стержней Z_2 обмотки. Каждая фаза состоит из одного стержня и примыкающих к нему двух участков короткозамыкающих колец (см. рис. 23.30). Расчетное активное сопротивление фазы беличьей клетки при температуре t

$$r_2 = k_r r_c + \frac{r_k}{2 \sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}},$$

где сопротивление стержня (сопротивление постоянному току)

$$r_c = \rho_{ct} l_c / S_c;$$

сопротивление участка кольца между соседними стержнями

$$r_k = \rho_{kt} \frac{\pi D_k}{Z_2 S_k},$$

l_c — длина стержня; S_c , S_k — соответственно площади сечений стержня и кольца; D_k — средний диаметр кольца; ρ_{ct} , ρ_{kt} — соответственно удельное сопротивление материала стержня и кольца при температуре t ; k_r — коэффициент увеличения сопротивления обмотки вследствие вытеснения тока. В асинхронных машинах при скольжении $s < 0,1$ $k_r \approx 1$; значения k_r при больших скольжениях рассчитываются согласно § 24.5, п. 2.

3. **Обмотки возбуждения синхронных машин.** Сопротивление обмотки возбуждения при температуре t

$$r_f = \rho_t L_f / S_f a_f,$$

где $L_f = 2pl_f w_f$ — полная длина проводников обмотки; w_f — число витков на полюс; l_f — средняя длина витка; S_f — сечение эффективного проводника; ρ_t — см. п. 1; a_f — число параллельных ветвей обмотки.

23.29. ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

Полное потокоцепление обмотки переменного тока может быть представлено в виде суммы главного потокоцепления и потокоцеп-

ления рассеяния. Главное потокоцепление обмотки обусловлено созданной ею основной гармонической магнитного потока, замыкающейся через воздушный зазор и сцепленной с обеими (первичной и вторичной) обмотками машины. Потокоцепление рассеяния обусловлено той частью создаваемого обмоткой магнитного потока, которая сцеплена только с данной обмоткой при условии, что основные гармонические индукции магнитного поля, созданные первичной и вторичной обмотками, взаимно уравновешивают друг друга.

1. **Главное индуктивное сопротивление самодуки обмотки** определяется потокоцеплением основной гармонической индукции магнитного поля обмотки:

$$x_r = 2\pi fL = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \frac{f\Psi}{I},$$

где L — индуктивность фазы обмотки, обусловленная главным потокоцеплением;

$$\Psi = \omega k_w \Phi_1;$$

I — действующее значение тока обмотки; f — частота тока; k_w — обмоточный коэффициент для основной гармонической (см. § 23.26, п. 4);

$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} B_{\delta 1} \tau l_{\delta}$ — магнитный поток основной гармонической индукции с амплитудой $B_{\delta 1}$.

Для неявнополюсной машины с m -фазной обмоткой

$$B_{\delta 1} = \frac{\mu_0}{k_n \delta k_{\delta 2}} \frac{m \sqrt{2}}{\pi} \frac{I \omega k_w}{r} C_p,$$

где $C_p \approx 1/k_{\delta 1}$ — коэффициент влияния пазов для основной гармонической (см. § 23.26, п. 6);

$$x_r = \frac{4mf}{\pi} \frac{\mu_0 \tau l_{\delta}}{k_n \delta'} \frac{\omega^2 k_w^2}{r},$$

где $\delta' = \delta k_{\delta 1} k_{\delta 2}$; k_n — коэффициент насыщения (см. § 24.6).

Главное сопротивление взаимной индукции обмотки x_{12} соответствует потокоцеплению основной гармонической поля взаимной индукции; расчетное выражение для x_{12} в асинхронных машинах — см. § 24.5, п. 1.

В явнополюсных машинах проводимости воздушного зазора по продольной и поперечной осям различны и поэтому отдельно рассматривают главные индуктивные сопротивления обмотки якоря по продольной и поперечной осям x_{ad} и x_{aq} (см. § 24.24).

2. **Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки** определяется потокоцеплением рассеяния. Точный расчет потокоцепления рассеяния связан с большими трудностями. Для облегчения практических расчетов поле рассеяния разделяют на три части — поля пазового, лобового и дифференциального рассеяния.

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы (без учета насыщения стали)

$$x_{\sigma} = 4\pi \mu_0 f \omega^2 \frac{l_{\delta} \lambda}{\rho q},$$

где λ — коэффициент магнитной проводимости для потокоцепления рассеяния на единицу

расчетной длины машины (безразмерная величина). В практических расчетах принимают

$$\lambda = \lambda_{\text{пз}} + \lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{д}},$$

где $\lambda_{\text{пз}}$, $\lambda_{\text{л}}$, $\lambda_{\text{д}}$ — коэффициенты проводимости пазового, дифференциального и лобового рассеяния.

а) **Индуктивное сопротивление пазового рассеяния.** Коэффициент проводимости пазового рассеяния

$$\lambda_{\text{пз}} = \lambda_{\text{по}} k_{\beta} + (\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{г}}) k'_{\beta},$$

где $\lambda_{\text{по}}$ — коэффициент проводимости части паза, занятой проводниками с током; $\lambda_{\text{п1}}$ — коэффициент проводимости верхней части паза, не занятой проводниками с током; $\lambda_{\text{г}}$ — коэффициент проводимости для потокоцепления рассеяния по головкам зубцов; k_{β} , k'_{β} — коэффициенты, учитывающие сокращение шага обмотки.

Формулы для коэффициента проводимости собственно пазового рассеяния ($\lambda_{\text{п}} = \lambda_{\text{по}} \times k_{\beta} + \lambda_{\text{п1}} k'_{\beta}$) при различных формах пазов без учета вытеснения тока следующие:

для пазов по рис. 23.15, а—г, е и рис. 23.27, е

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{h_1 - h_4}{3b_{\text{п}}} k_{\beta} + \left(\frac{h_2}{b_{\text{п}}} + \frac{3h_3}{b_{\text{п}} + 2b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_{\beta} + \frac{h_4}{4b_{\text{п}}},$$

где для паза по рис. 23.15, а $h_3 = 0$, $h_2 = h'_2$, $h_{\text{ш}} = 0$; $b_{\text{ш}} = b_{\text{п}}$; для паза по рис. 23.15, г, е $h_4 = 0$, $b_{\text{п}} = b$; размеры h_1 и h_4 берутся по головке меди; для пазов по рис. 23.15, д и рис. 23.41, а

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{h_1}{3b} k_{\beta} + \left(0,785 - \frac{b_{\text{ш}}}{2b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_{\beta}.$$

Коэффициенты k_{β} , k'_{β} зависят от относительного шага обмотки $\beta = y/\tau$ и определяют следующим образом:

$$k_{\beta} = \frac{1 + 3k'_{\beta}}{4};$$

$$k'_{\beta} = \frac{1 + 3\beta}{4} \text{ при } \frac{2}{3} \leq \beta \leq 1;$$

$$k'_{\beta} = \frac{6\beta - 1}{4} \text{ при } \frac{1}{3} \leq \beta \leq \frac{2}{3};$$

для однослойных и короткозамкнутых обмоток $k_{\beta} = k'_{\beta} = 1$.

Коэффициент проводимости пазового рассеяния для некоторых пазов, применяемых в обмотках типа беличьей клетки, без учета эффекта вытеснения тока:

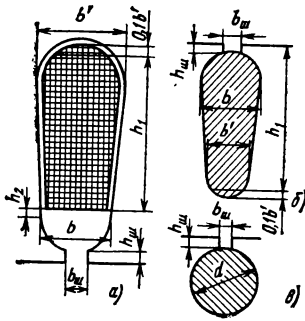
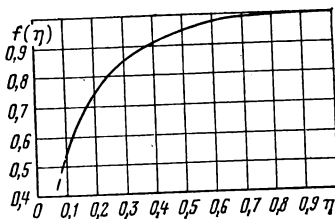
для круглого паза (рис. 23.41, в)

$$\lambda_{\text{п}} = \left(0,785 - \frac{b_{\text{ш}}}{2d} \right) + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}};$$

для грушевидного паза (рис. 23.41, б)

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8S_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{h_{\text{ш}}}{2b} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}},$$

где S_c — сечение стержня;

Рис. 23.41. К расчету коэффициента λ_{Π} Рис. 23.42. К расчету $f(\eta)$

для клинообразного паза (см. рис. 23.27, ж)

$$\lambda_{\Pi} = \frac{h_1}{3b_{\Pi 2}} f(\eta) + \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi}},$$

где $\eta = b_{\Pi 1}/b_{\Pi 2}$; $f(\eta)$ — по рис. 23.42.

Примечание. Для закрытых пазов (см. рис. 23.27, в, г) вместо h_{Π}/b_{Π} следует подставлять $0,3 + 1,12 \cdot 10^{-4} h_{\Pi}'/I_2$, где h_{Π}' — высота перемычки над пазом, м; I_2 — ток стержня, А.

Коэффициент проводимости пазового рассеяния с учетом вытеснения тока

$$\lambda_{\Pi \Sigma} = k_x \lambda_{\Pi 0} + (\lambda_{\Pi} - \lambda_{\Pi 0}),$$

где $\lambda_{\Pi 0}$ — коэффициент проводимости для части паза, занятой проводниками с током; $\lambda_{\Pi 0} = h_1/3b_{\Pi}$ — для прямоугольного, трапециевидного и клинообразного пазов; $\lambda_{\Pi 0} = 0,785 - b_{\Pi}/2d$ — для круглого паза;

$$\lambda_{\Pi 0} = \frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8S_c}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_{\Pi}}{2b}$$

— для грушевидного паза;
 k_x — коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления.

Для прямоугольного паза

$$k_x = \frac{1}{m_3^2} \lambda(\xi) + \frac{m_3^2 - 1}{m_3^2} \mu(\xi),$$

где $\lambda(\xi)$ и $\mu(\xi)$ — по рис. 23.40; ξ — см. § 23.28, п. 1.

В якорных обмотках, как правило, $a_s < 1$ см, и в этом случае при $f = 50$ Гц и медных проводниках $k_x \approx 1$.

Проводники с высотой $a_s > 1$ см встречаются обычно только в короткозамкнутых об-

мотках; расчет коэффициента k_x для таких обмоток см. в § 24.5.

Коэффициент проводимости λ_{Γ} определяется в функции отношения b_{Π}/δ' по формуле

$$\lambda_{\Gamma} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{4\delta'}{b_{\Pi}} \operatorname{arctg} \frac{b_{\Pi}}{2\delta'} + \ln \frac{1 + \left(\frac{2\delta'}{b_{\Pi}}\right)}{4} \right],$$

где $\delta' = \delta k_{\delta 2}$ — с учетом пазов противолежащего сердечника.

Индуктивное сопротивление пазового рассеяния

$$x_{\Pi} = 4\pi\mu_0 f\omega^2 \frac{l_{\delta}}{\rho q} \lambda_{\Pi \Sigma}.$$

б) Индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния. Процесс полезного преобразования в электрической машине механической энергии в электрическую (или обратный процесс) осуществляется с участием только основной гармонической магнитного поля.

Все гармонические магнитного поля в воздушном зазоре, кроме основной, образуют поля рассеяния, называемые полями дифференциального рассеяния или полями рассеяния воздушного зазора. Эти поля равны разности между полным полем и основной гармонической поля воздушного зазора (отсюда название «дифференциальное рассеяние»). Индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния равно сумме составляющих, соответствующих бесконечному ряду гармонических поля в зазоре машины:

$$x_{\Delta} = 4\pi\mu_0 f\omega^2 \frac{l_{\delta}}{\rho q} \lambda_{\Delta},$$

где коэффициент проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{\Delta} = \frac{1}{12} \frac{t_z}{\delta'} k_{\Delta} \xi;$$

$$\xi = 3 \left(\frac{Z'}{\pi v_{\text{осн}}} \right)^2 \sum_{v \neq v_{\text{осн}}} \left(\frac{v_{\text{осн}} k_{\omega v}}{v} \right)^2 k_{\omega v} k_{\Delta v};$$

k_{Δ} — коэффициент явнополюсности (для неявнополюсных машин $k_{\Delta} = 1$, для синхронных явнополюсных машин k_{Δ} — см. § 24.24); $k_{\omega v}$ — коэффициент, учитывающий влияние пазов на v -ю гармоническую поля (учитываются пазы только того сердечника, на котором расположена рассматриваемая обмотка):

$$k_{\omega v} \approx 1 - \Lambda_{v=1} \frac{v^2}{v^2 - Z'^2},$$

где $\Lambda_{v=1}$ — по § 23.26; $k_{\Delta v}$ — коэффициент демпфирования v -й гармонической поля. Для якорных обмоток машин с беличьей клеткой на роторе или с массивным зубчатым ротором

$$k_{\Delta v} = 1 - k_{\omega 2v}^2 k_{\text{ск}2v}^2.$$

где

$$k_{w2v} = \frac{Z_2}{\pi v} \sin \frac{\pi v}{Z_2};$$

$k_{ск2v}$ — коэффициент скоса беличьей клетки по отношению к v -й гармонической поля (рассчитывается согласно § 23.26, п. 4).

Для статоров асинхронных двигателей с фазным ротором $k_{dv} \approx 1$.

Расчет коэффициентов дифференциального рассеяния асинхронных машин см. в § 24.5, синхронных машин — в § 24.24.

Примечание. В выражениях для ξ и $k_{шв}$ под Z' понимается число пазов, приходящихся на повторяющуюся часть обмотки, т. е. для целых обмоток ($v_{осн}=1$) $Z'=Z/p$, для дробных обмоток ($v_{осн} \neq 1$) $Z'=Z/t$, где t — общий наибольший делитель чисел Z и p (см. § 23.22, п. 8).

в) Индуктивное сопротивление лобового рассеяния

$$x_{л} = 4\pi\mu_0 f\omega^2 \frac{l_{\delta}}{pq} \lambda_{л},$$

где коэффициент проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{л} = \frac{1}{2q} \frac{l_s}{l_{\delta}} \lambda'_{л};$$

$\lambda'_{л}$ — коэффициент; l_s — некоторый характерный размер лобовой части (см. § 24.5).

Расчет коэффициентов лобового рассеяния $\lambda_{л}$ асинхронных машин см. в § 24.5, синхронных машин — в § 24.24.

В. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

23.30. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН (САПР ЭМ)

Использование ЭВМ для проведения инженерных расчетов электрических машин началось в конце 50-х годов. Создание мощных и быстродействующих ЭВМ и разработка алгоритмических языков высокого уровня сделали доступным процесс программирования не только для квалифицированных программистов, но и для инженеров.

На первом этапе вычислительная техника использовалась для проведения только поверочных расчетов машин с заданной геометрией по известным инженерным методикам. Применение вычислительной техники позволило включить в расчетные методики аналитические решения, которые из-за большого объема вычислений не могли быть реализованы при «ручном» счете. Автоматизация «ручного» счета привела к повышению точности и резкому сокращению времени расчета проектного варианта электрической машины.

К середине 70-х годов наметилась тенденция к объединению отдельных расчетов в системы, позволяющие осуществлять расчеты серий электрических машин.

Применение ЭВМ в проектировании особенно эффективно при переходе от выполнения отдельных инженерных расчетов к созданию комплексных систем автоматизированного проектирования (САПР) изделия в целом, охватывающих этапы от формирования технического задания до технологической подготовки производства и управления испытанием опытного образца (см. разд. 8).

Современный период применения вычислительной техники в процессе проектирования электрических машин характеризуется полной перестройкой технологии проектирования на основе создания автоматизированной системы инженерных заданий и переноса проекта в виде цифровой модели в память ЭВМ. Создают-

ся принципиально новые условия проектирования.

САПР асинхронных двигателей (АД) [23.20] (структурная схема на рис. 23.43) ориентирована на автоматизацию проектных работ на всех основных стадиях и этапах разработки АД.

Система позволяет определять оптимальные размеры активной части машины, удовлетворяющие техническим и технологическим требованиям, выдавать отдельные чертежи конструкции АД (общий вид, узлы и детали) на графопостроитель, корректировать конструкторско-технологическую документацию в процессе разработки и серийного производства с минимальным использованием ручных работ. С помощью подсистемы оптимального расчетного проектирования, исходя из технического задания и критериев оценки технико-экономических показателей разрабатываемых двигателей, осуществляется определение оптимальных электромагнитных характеристик и геометрических размеров активной части машины. Подсистема расчетного проектирования используется также при разработке многочисленных модификаций двигателей.

При расчете двигателя используется свыше 100 исходных данных. Часть из них predetermined требованиями эксплуатации, материалами, используемыми в производстве, опытом проектирования предшествующих серий. Другая часть исходных данных устанавливается на основании предварительных исследований. К ним относятся выбор класса нагревостойкости изоляции, степени унификации различных исполнений и т. д.

Задача оптимального расчетного проектирования является многокритериальной. В качестве основного критерия принимается критерий минимума суммарных затрат, учитывающий стоимость изготовления двигателя и расходы на его эксплуатацию.

Кроме поиска оптимальных параметров машины по основному критерию осуществляется также дополнительный поиск по минимуму длины сердечника статора.

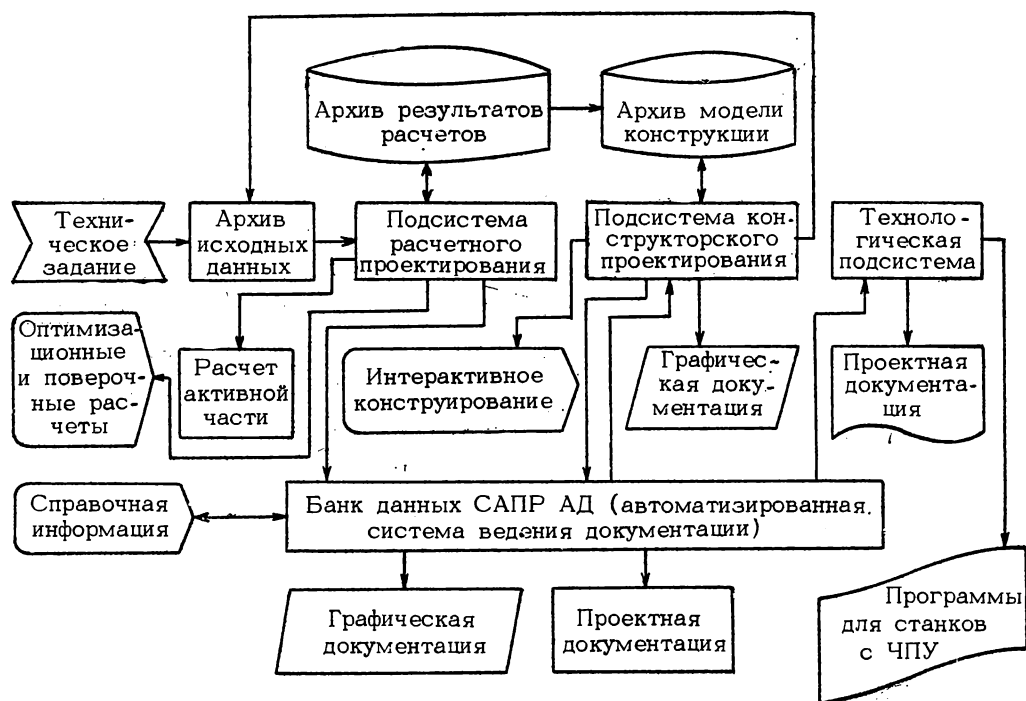


Рис. 23.43. Структурная схема САПР АД

Возможно использование других критериев: максимума полезной мощности, минимальной стоимости машины, минимума массы и др.

В математической модели АД предусмотрены два вида ограничений: ограничения, вытекающие из требований стандартов (допустимые значения пускового и максимального моментов, пускового тока, температуры обмотки), требований надежности (скорость нарастания температуры в режиме короткого замыкания), и лимитеры, связанные с конструктивными и технологическими требованиями (минимальная ширина зубца, высота ярма статора) и т. д.

Узлы и детали всех двигателей, входящих в отрезки серии (группы смежных высот осей вращения), как правило, имеют геометрически подобные формы. Некоторые детали являются подобными для всех машин серии. Характерна также широкая унификация узлов, деталей, материалов в пределах одной высоты оси вращения, а по некоторым элементам — и в пределах ряда высот. Это позволяет обобщить геометрию конструкции, другими словами, создать ее математическую модель. Модель дает возможность по размерам активной части машины вычислять размеры сборочных единиц и отдельных деталей АД [23.20].

Процесс проектирования АД в условиях функционирования САПР складывается по следующей схеме (рис. 23.44).

Проектировщик, работая с ЭВМ, может производить работу в одном из следующих режимов: генерация математической модели, оптимизация параметров в автоматическом режиме, оптимизация параметров в режиме диалога, конструирование в режиме диалога, вывод графической информации на графопостроитель, корректировка чертежей в производстве,



Рис. 23.44. Структурная схема проектирования асинхронных двигателей с использованием САПР

представление по запросам конструкторской и технологической информации.

Структурная схема комплекса технических средств САПР АД представлена на рис. 23.45.

По данным ВНИИЭМ проектирование серий АД на ЭВМ ускоряется в 4000 раз и уде-

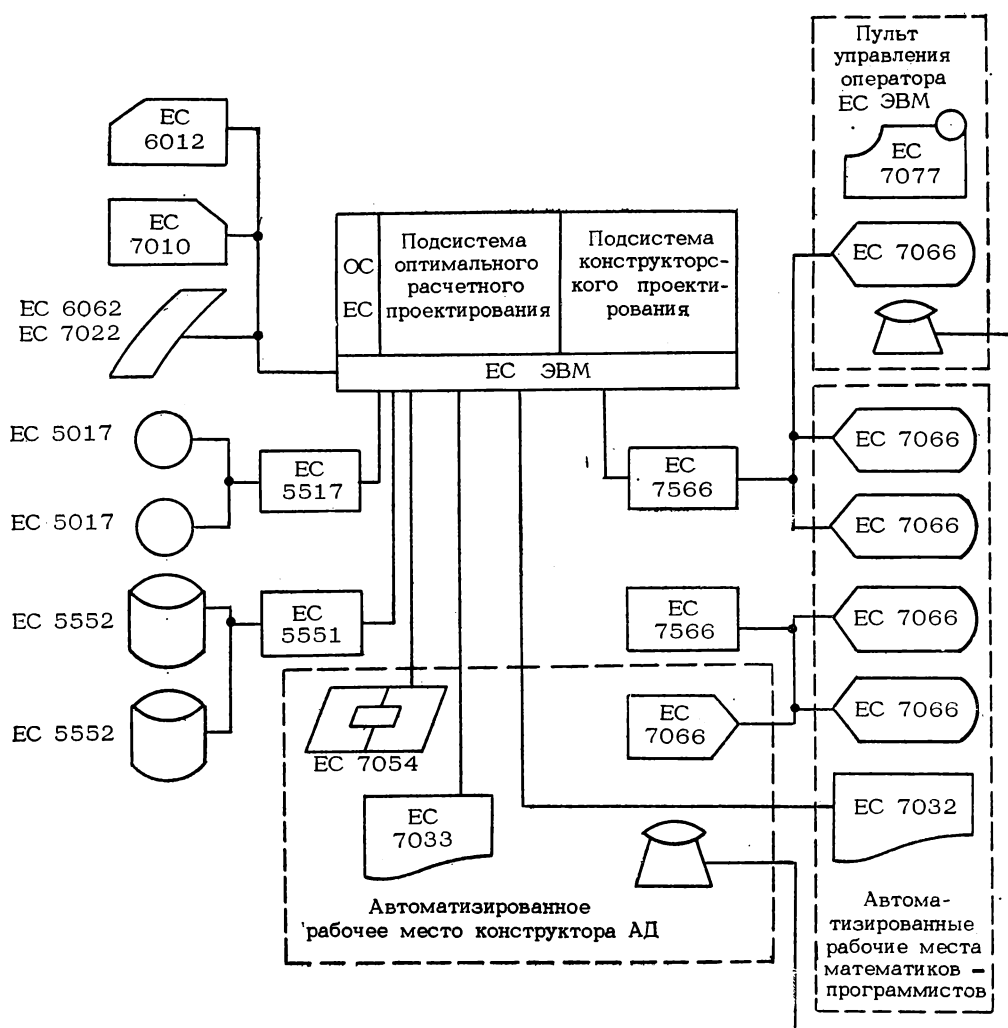


Рис. 23.45. Структурная схема комплекса технических средств САПР АД

шевляется в 80 раз по сравнению с ручным расчетом.

Тяжелое электромашиностроение представляет одну из наиболее трудных для автоматизации областей в связи с мелкосерийностью продукции, сложной конфигурацией деталей и невозможностью сохранения конструкторских решений при резком повышении мощности машин, при изменении системы охлаждения или габаритных ограничений.

Для различных машин и различных целей созданы специализированные программы электромагнитных расчетов [23.20]. В частности, для приближенного расчета магнитного поля турбогенератора, работающего в сложных режимах, используется подробная схема замещения магнитной цепи. При расчете магнитного поля машины постоянного тока, где требуется точный учет геометрии магнитопровода, применяется метод конечных элементов для определения поля векторного магнитного потенциала. Метод конечных разностей с расчетной сеткой в полярных координатах ока-

заялся наиболее удобен для расчета магнитного поля в активной зоне турбогенератора при внутренних внезапных коротких замыканиях. Для расчета трехмерного электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора с учетом вихревых токов применяется прямое решение уравнений Максвелла с расчетной сеткой в цилиндрической системе координат. Для машин с криогенным охлаждением широко используются методы определения полей скалярного магнитного потенциала.

С целью повышения степени использования активных материалов машин значительно усовершенствованы методики тепловых расчетов, в первую очередь расчетов нестационарных температурных полей в непрерывных контурах циркуляции теплоносителей, развиты численные методы решения пространственных нелинейных задач теплопроводности с определением полей вектора теплового потока.

Для механических расчетов дисковых якорей машин постоянного тока создан комплекс программ решения плоской задачи теории уп-

пакет программ элементарных геометрических фигур и типовых (простых) элементов конструкции (графических фрагментов).

На структурной схеме сплошными линиями показаны функциональные связи между компонентами диалоговой подсистемы при синтезе конструкции методом выбора альтернатив. В случае же необходимости добавления в процессе синтеза конструкции новых графических фрагментов управление передается системе ПРИЗ и функциональные связи между компонентами подсистемы осуществляются по путям, показанным пунктирными линиями. Используя информацию, имеющуюся в описании задания, система в соответствии с графом, описание которого содержится в блоке 7, определяет последовательность моделей, необходимую для вычерчивания конструкции той или иной геометрии. Для этого система формирует на входном языке диалога соответствующие директивы и выдает информацию о состоянии модели проектируемого изделия, о значениях входных и выходных величин, а также информирует пользователя о необходимых дальнейших действиях для завершения процесса проектирования.

Последующим этапом развития САПР должно явиться объединение с автоматизированной системой научных исследований электрических машин.

23.31. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Развитие вычислительной техники способствует совершенствованию методов математического моделирования электрических машин. Главной проблемой остается моделирование электромагнитного поля машины, точное знание которого позволяет впоследствии перейти к расчету всех электрических величин, параметров, потерь, моментов и т. д.

В настоящее время разработаны различные аналитические методы расчета полей, которые позволяют при достаточно правдоподобных допущениях определить параметры математических моделей, отражающих дискретный характер структуры электрических машин, взаимное перемещение зубчатых сердечников, нелинейность свойств их материалов, наведенные токи в установившихся и переходных процессах.

Так, метод проводимостей зубцовых контуров и метод конечных элементов при реализации на ЭВМ дают возможность производить электромагнитные расчеты электрических машин с учетом насыщения ферромагнитных сердечников и реальной конфигурации воздушно-

го зазора. Разрабатываются методы расчета трехмерных магнитных полей.

В способах моделирования полей и процессов наблюдается заметное взаимное проникновение. Созданы гибридные модели, позволяющие объединить, например, модели на АВМ и цифровых ЭВМ, сочетающие преимущества различных способов решения.

При расчете динамических режимов электрических машин получила распространение математическая модель — обобщенная электрическая машина [23.7, 23.8], представляющая собой многообмоточную структуру, состоящую из групп статорных и роторных обмоток, находящихся в относительном движении.

Для анализа установившихся и переходных режимов электрохимических систем зачастую достаточно при математическом моделировании электрической машины использовать обобщенную машину в двухфазной системе координат.

Это идеализированная двухполусная машина с двумя парами обмоток на статоре (ω_α^s , ω_β^s) и роторе (ω_α^r , ω_β^r). Идеализированная машина — симметричная, ненасыщенная, имеет гладкий зазор. Энергия магнитного поля в ней сосредоточена в воздушном зазоре, и поле синусоидальное.

В воздушном зазоре обобщенной машины вращающееся магнитное поле может создаваться обмотками статора и ротора. Напряжения статора (u_α^s , u_β^s) или ротора (u_α^r , u_β^r) создают смещенные во времени токи, а за счет пространственного сдвига обмоток в зазоре создаются вращающиеся поля.

Для упрощения уравнений электрохимического преобразования энергии, при условии инвариантности мощности, рассматривается псевдонеподвижная машина, в которой в цепи роторных обмоток вводится ЭДС вращения. В координатах α , β уравнения напряжений обобщенной машины, выраженные через потокосцепления, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} u_\alpha^s &= i_\alpha^s r_\alpha^s + \frac{d\Psi_\alpha^s}{dt}; \\ u_\beta^s &= i_\beta^s r_\beta^s + \frac{d\Psi_\beta^s}{dt}; \\ u_\alpha^r &= i_\alpha^r r_\alpha^r + \frac{d\Psi_\alpha^r}{dt} + \omega_r \Psi_\alpha^r; \\ u_\beta^r &= i_\beta^r r_\beta^r + \frac{d\Psi_\beta^r}{dt} - \omega_r \Psi_\beta^r. \end{aligned}$$

Уравнения напряжений, выраженные через токи, имеют вид

$$\begin{pmatrix} u_\alpha^s \\ u_\alpha^r \\ u_\beta^r \\ u_\beta^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_\alpha^s + \frac{d}{dt} L_\alpha^s & \frac{d}{dt} M \\ \frac{d}{dt} M & r_\alpha^r + \frac{d}{dt} L_\alpha^r \\ -M\omega_r & -L_\alpha^r \omega_r \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha^s \\ i_\alpha^r \\ i_\beta^r \\ i_\beta^s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ L_\beta^r \omega_r & M\omega_r \\ r_\beta^r + \frac{d}{dt} L_\beta^r & \frac{d}{dt} M \\ \frac{d}{dt} M & r_\beta^s + \frac{d}{dt} L_\beta^s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha^s \\ i_\alpha^r \\ i_\beta^r \\ i_\beta^s \end{pmatrix}.$$

Здесь $u_{\alpha}^s, u_{\beta}^s, u_{\alpha}^r, u_{\beta}^r, i_{\alpha}^s, i_{\beta}^s, i_{\alpha}^r, i_{\beta}^r$ — соответственно напряжения и токи в обмотках статора и ротора по осям α и β ; $r_{\alpha}^s, r_{\beta}^s, r_{\alpha}^r, r_{\beta}^r$ — активные сопротивления обмоток статора и ротора; M — взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора; $L_{\alpha}^s, L_{\beta}^s, L_{\alpha}^r, L_{\beta}^r$ — полные индуктивности обмоток статора и ротора по осям α и β .

Индуктивности обмоток определяются по соотношениям

$$L_{\alpha}^s = M + l_{\alpha}^s;$$

$$L_{\beta}^s = M + l_{\beta}^s;$$

$$L_{\alpha}^r = M + l_{\alpha}^r;$$

$$L_{\beta}^r = M + l_{\beta}^r,$$

где $l_{\alpha}^s, l_{\beta}^s, l_{\alpha}^r, l_{\beta}^r$ — индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора по осям α и β .

Активные сопротивления и индуктивности относятся к фазе машины и определяются расчетным или опытным путем [23.7, 23.8].

При решении задачи с постоянными параметрами отдается предпочтение величинам, рассчитанным для исследуемой зоны переходного процесса.

Процессы преобразования энергии описываются уравнениями напряжений и уравнением движения

$$M_a = \frac{1}{p} J \frac{d\omega_r}{dt} \pm M_c,$$

где M_a — электромагнитный момент; M_c — момент сопротивления; J — момент инерции вращающихся частей.

Выражение для электромагнитного момента имеет вид

$$M_a = \frac{m}{2} M (i_{\beta}^s i_{\alpha}^r - i_{\alpha}^s i_{\beta}^r),$$

или

$$M_a = \frac{m}{2} \frac{M}{L^s L^r - M^2} (\Psi_{\beta}^s \Psi_{\alpha}^r - \Psi_{\alpha}^s \Psi_{\beta}^r),$$

где m — число фаз; M — взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора.

Обобщенная машина в различных координатных системах с переменными параметрами, определяемыми «полевыми» методами, применяется при проектировании электрических машин с учетом динамических процессов.

Список литературы

- 23.1. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. 1, 2, 3. М.: Энергия, 1974, 1963, 1968, 240, 416, 223 с.
- 23.2. Костенко М. П. Электрические машины. Часть специальная. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1949. 712 с.
- 23.3. Костенко М. П. и Пиотровский Л. М. Электрические машины. Ч. 1, 2. Л.: Энергия, 1972, 1973. 543, 648 с.
- 23.4. Вольдек А. И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
- 23.5. Важнов А. И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1969. 768 с.
- 23.6. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. 948 с.
- 23.7. Копылов И. П. Электромеханические преобразователи. М.: Энергия, 1973. 400 с.
- 23.8. Копылов И. П. Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах. М.: Высшая школа, 1980. 263 с.
- 23.9. Казовский Е. Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 624 с.
- 23.10. Кучера Я., Галл И. Обмотки электрических машин/Пер. с чешск. Прага: Изд-во Академии наук, 1963. 982 с.
- 23.11. Филиппов И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. Л.: Энергия, 1974. 384 с.
- 23.12. Антонов М. В., Герасимова Л. С. Технология производства электрических машин. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
- 23.13. Борисенко А. И., Костиков О. Н., Яковлев А. И. Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 297 с.
- 23.14. Талалов И. И. Параметры и характеристики явнополусных синхронных машин. М.: Энергия, 1978. 264 с.
- 23.15. Обмотки электрических машин/В. И. Зимин, М. Я. Каплан, А. М. Палей и др. Л.: Энергия, 1975. 488 с.
- 23.16. Геллер Б., Гамата В. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах/Пер. с чешск. М.: Энергия, 1964. 263 с.
- 23.17. Сорочер Т. Г. Вихревые токи в обмотках с транспозицией лобовой части. — Тр. ВНИИЭМ, 1971, т. 36, с. 32—67.
- 23.18. Специальные электрические машины (Источники и преобразователи энергии)/А. И. Бертинов, Д. А. Бут, С. Р. Мизюрин и др.; Под ред. А. И. Бертинова. М.: Энергоиздат, 1982. 552 с.
- 23.19. Норенков И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высшая школа, 1980. 308 с.
- 23.20. Системы автоматизированного проектирования в электротехнической промышленности. — Тр. ВНИИЭМ, 1982, т. 71, 143 с.
- 23.21. Терзян А. А. Автоматизированное проектирование электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 255 с.
- 23.22. Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. М.: Высшая школа, 1980. 359 с.
- 23.23. Гайфуллин Э. Ш., Климов В. Е. Применение ЭВМ в автоматизированном проектировании. — Тр. Моск. энерг. ин-та, 1980, с. 96.
- 23.24. Геминтерн В. И., Каган Б. М. Методы оптимального проектирования. М.: Энергия, 1980. 160 с.
- 23.25. ГОСТ 23501.0-79. Системы автоматизированного проектирования. Основные положения.
- 23.26. ГОСТ 22487-77. Проектирование автоматизированное. Термины и определения.

Раздел 24

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

СОДЕРЖАНИЕ

А. Асинхронные машины	
24.1. Основные типы асинхронных машин	275
24.2. Устройство и принцип действия трехфазной асинхронной машины	275

24.3. Основные требования, предъявляемые к асинхронным двигателям. Стандарты на асинхронные машины	277
24.4. Определение главных размеров трехфазных асинхронных двигателей	277

24.5. Активные и индуктивные сопротивления обмоток	278	24.24. Индуктивные сопротивления обмоток	315
24.6. Расчет магнитной цепи асинхронной машины	281	24.25. Активные сопротивления обмоток	317
24.7. Основные уравнения. Схемы замещения и векторная диаграмма асинхронной машины	283	24.26. Расчет магнитной цепи синхронной машины при холостом ходе	318
24.8. Основные энергетические соотношения вращающие моменты, механическая характеристика асинхронной машины	285	24.27. Расчет тока возбуждения при нагрузке. Основные уравнения и векторные диаграммы	320
24.9. Потери и КПД асинхронной машины	286	24.28. Характеристики синхронного генератора при работе на автономную нагрузку. Токи короткого замыкания	322
24.10. Круговая диаграмма асинхронной машины. Рабочие характеристики асинхронного двигателя	287	Характеристики (322). Симметричное (трехфазное) короткое замыкание на выводах машины (323). Несимметричные короткие замыкания на выводах машины (324)	
24.11. Асинхронные короткозамкнутые двигатели с улучшенными пусковыми свойствами	290	24.29. Параллельная работа синхронных машин	324
24.12. Особые режимы работы и особые исполнения асинхронных машин	291	Способы включения синхронных машин на параллельную работу (способы синхронизации) (324). Работа синхронной машины параллельно с мощной электрической сетью (325). Качания синхронных машин (326)	
Б. Синхронные машины			
24.13. Основные типы синхронных машин	293	24.30. Синхронные двигатели	327
24.14. Устройство и принцип действия трехфазной синхронной машины. Устройство синхронной машины (294). Принцип действия синхронной машины (295)	294	24.31. Параметры и постоянные времени обмоток синхронной машины	328
24.15. Системы возбуждения синхронных машин	296	24.32. Потери и КПД синхронной машины	330
24.16. Основные требования, предъявляемые к синхронным машинам. Стандарты на синхронные машины	297	В. Машины постоянного тока	
24.17. Синхронные машины с косвенным охлаждением	299	24.33. Устройство и принцип действия машины постоянного тока	332
24.18. Синхронные машины с непосредственным охлаждением. Турбогенераторы (300). Гидрогенераторы (306)	300	24.34. Типы машин постоянного тока	333
24.19. Определение главных размеров синхронных машин	307	24.35. Основные требования, предъявляемые к нормальным машинам постоянного тока	335
24.20. Магнитное поле в зазоре. Магнитодвижущие силы. Коэффициенты поля	310	24.36. Определение главных размеров и электромагнитных нагрузок машин постоянного тока	335
24.21. Эквивалентирование демпферной обмотки. Коэффициенты поля демпферной обмотки	313	24.37. ЭДС, МДС и сопротивления обмоток	336
24.22. Коэффициенты приведения роторных контуров	314	24.38. Расчет магнитной цепи при холостом ходе	337
24.23. Система относительных единиц синхронной машины	314	24.39. Расчет магнитной цепи при нагрузке	338
		24.40. Уравнение напряжений. Вращающий момент	339
		24.41. Характеристики генераторов постоянного тока	339
		24.42. Характеристики двигателей постоянного тока	341
		24.43. Потери и КПД машины постоянного тока	341
		Список литературы	342

А. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

24.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Основное применение асинхронные машины находят в качестве двигателей; в качестве генераторов они применяются крайне редко. Двигатели делятся на два основных типа: *двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором*.

Наибольшее распространение во всех областях техники имеют дешевые в производстве и надежные в эксплуатации двигатели с короткозамкнутым ротором. Двигатели обладают высокими техническими показателями (жесткая механическая характеристика; $\cos \varphi = 0,6 \div 0,92$; $\eta = 0,6 \div 0,94$; $M_n/M_{ном} = 0,9 \div 2,2$; $I_n/I_{ном} = 4 \div 7,5$).

Широкое применение находят *двигатели с вытеснением тока ротора (двигатели с глубоким пазом ротора и двигатели с двойной клеткой ротора; см. § 24.11)*. По сравнению с обычными короткозамкнутыми двигателями они обладают повышенным пусковым моментом ($M_n/M_{ном} = 1,5 \div 2$) при сравнительно небольшом пусковом токе ($I_n/I_{ном} = 4 \div 7,5$).

Двигатели с фазным ротором применяются при необходимости плавного регулирования частоты вращения, а также при тяжелых ус-

ловиях пуска. Они обладают наилучшими из всех асинхронных двигателей пусковыми свойствами ($M_n/M_{ном} = 2 \div 3$ при $I_n/I_{ном} = 2,5 \div 4$).

Многоскоростные асинхронные двигатели (см. § 25.4) с переключением числа полюсов обмотки статора применяются в приводах со ступенчатым регулированием частоты вращения. Они имеют 2, 3 или 4 номинальные частоты вращения, жесткую механическую характеристику, пониженный $\cos \varphi$.

Двигатели с массивным ротором, несмотря на простоту конструкции (ротор выполнен в виде сплошного ферромагнитного цилиндра без какой-либо обмотки), находят ограниченное применение, так как имеют мягкую механическую характеристику и низкий $\cos \varphi$.

24.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРЕХФАЗНОЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

1. Устройство асинхронных машин. На рис. 24.1 показаны основные элементы конструкции асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором. Сердечники статора и ротора набираются из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Пред-

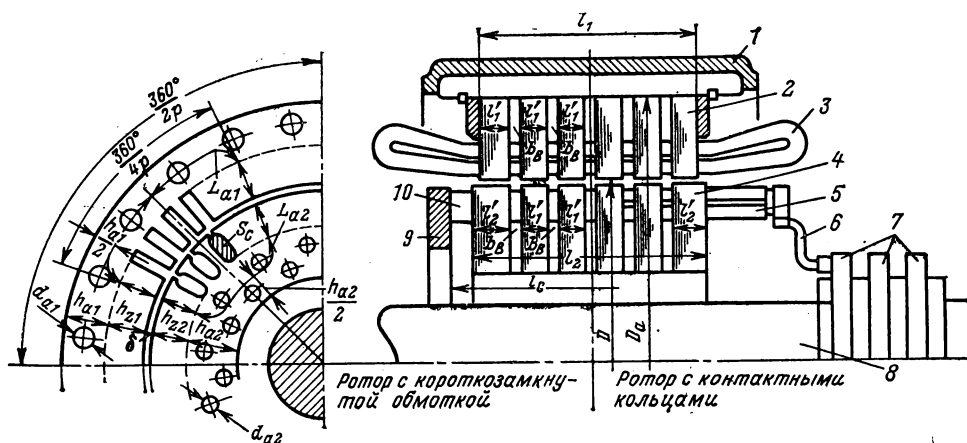


Рис. 24.1. Конструкция асинхронной машины

1 — станина (корпус статора); 2 — пакет сердечника статора; 3 — обмотка статора; 4 — пакет сердечника ротора; 5 — трехфазная изолированная обмотка ротора двигателя с фазным ротором; 6 — вывод обмотки ротора; 7 — контактные кольца; 8 — вал; 9 — короткозамыкающее кольцо короткозамкнутого ротора; 10 — стержень короткозамкнутого ротора

варительно листы лакируются (листы ротора — не всегда). Сердечник статора фиксируется в металлической станине (серый чугун, силумин, сталь), которая неподвижно закрепляется на фундаментной плите. Сердечник ротора насаживается либо непосредственно на вал, либо на сварную (литую) втулку, которая укрепляется на валу. Концы вала опираются на два подшипника. Между сердечниками статора и ротора имеется небольшой воздушный зазор. В пазах сердечника статора размещается трехфазная якорная обмотка (см. § 23.22), в пазах сердечника ротора — трехфазная якорная обмотка, подобная обмотке статора (двигатель с фазным ротором), или короткозамкнутая обмотка типа беличьей клетки (см. § 23.25). В двигателях с фазным ротором выводные концы обмотки ротора, фазы которой сопрягаются обычно в звезду, присоединяются к трем контактным кольцам, через которые с помощью щеток в цепь обмотки ротора можно вводить добавочное сопротивление или дополнительную ЭДС для изменения пусковых или рабочих свойств машины (см. § 24.12); щетки позволяют также замкнуть обмотку накоротко.

Конкретное конструктивное оформление асинхронных машин очень разнообразно. Оно зависит от ряда факторов: способа защиты от воздействия среды, способа охлаждения, габаритов машины и т. д.

Конструкция асинхронных машин описана в [23.1, 24.1, 24.4].

2. Принцип действия асинхронной машины. Трехфазная обмотка асинхронной машины, по которой протекают токи i_A, i_B, i_C частотой f_1 , создает вращающееся магнитное поле (см. § 23.26, п. 1). Частота вращения поля $n_1 = 60f_1/p$ называется синхронной. Поток Φ_1 , созданный вращающейся в пространстве МДС обмотки статора $\bar{F}_1$, индуцирует в обмотке ротора ЭДС, под действием которой в ней протекает ток.

Частота ЭДС и тока зависит от относительной разности частот вращения поля и ротора, называемой *скольжением*:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}.$$

При номинальной нагрузке $s = 0,03 \div 0,05$. Частота ЭДС и тока в обмотке ротора $f_2 = sf_1$.

Токи ротора образуют вращающуюся МДС $\bar{F}_2$, которая создает магнитный поток Φ_2 . Магнитный поток Φ_2 вращается относительно ротора с частотой $n_2 = 60f_2/p = sn_1$, а относительно статора с синхронной частотой n_1 . Таким образом, магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 вращаются синхронно, образуя суммарный поток машины Φ , который можно рассматривать как созданный результирующей МДС обеих обмоток $\bar{F}_0 = \bar{F}_1 + \bar{F}_2$ (рис. 24.2).

Результирующий поток Φ наводит в обмотке ротора ЭДС e_2 , под действием которой в обмотке протекает ток i_2 . Ток i_2 отстает по фазе от ЭДС e_2 , так как обмотка ротора имеет некоторое индуктивное сопротивление. В результате взаимодействия тока ротора i_2 с вращающимся магнитным потоком Φ возникает

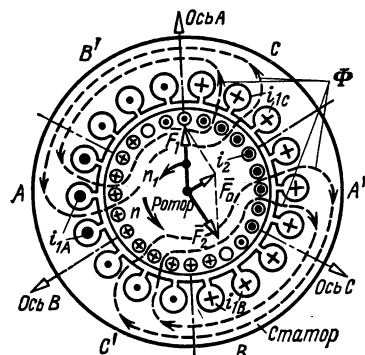


Рис. 24.2. К объяснению принципа действия трехфазного асинхронного двигателя ($2p=2$). Распределение токов по фазам обмотки статора показано для момента времени, когда ток в фазе А имеет максимальное значение $i_{1A} = \sqrt{2} I_{1A}$

вращающий электромагнитный момент $M \sim \Phi i_2 \cos \varphi_2$, где φ_2 — угол сдвига по фазе между e_2 и i_2 . В режиме двигателя ротор под действием момента M приходит во вращение с частотой n . Частота вращения ротора, выраженная через скольжение, равна $n = (1-s)n_1$. При пуске двигателя ($n=0$) скольжение $s=1$; при вращении ротора с синхронной частотой ($n=n_1$) $s=0$ и, следовательно, $M=0$, т. е. двигатель не может достичь синхронной скорости.

При работе асинхронной машины в режиме двигателя $0 < n < n_1$ ($0 < s < 1$) и электромагнитный момент является вращающим. Если ротор привести во вращение с помощью постороннего двигателя со скоростью $n > n_1$ ($s < 0$), то асинхронная машина будет работать в режиме генератора, отдавая активную мощность в сеть. Если ротор под действием внешнего момента вращается навстречу полю, т. е. $n < 0$ ($s > 1$), то асинхронная машина работает в режиме тормоза, потребляя из сети активную мощность. В режиме генератора и тормоза электромагнитный момент асинхронной машины является тормозящим.

Примечания: 1. В дальнейшем индексом 1 обозначаются величины статора, индексом 2 — ротора.
2. На рис. 24.2 буквами A и A' ; B и B' ; C и C' обозначены группы проводников обмоток фаз, в которых попарно ток протекает в противоположных направлениях.

24.3. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЯМ. СТАНДАРТЫ НА АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Общие технические требования, которым согласно стандартам должны соответствовать электрические машины, изложены в разд. 23 (стандарты перечислены в § 23.20).

Некоторые важные требования, которые дополнительно предъявляются к асинхронным электродвигателям, формулируются в стандартах на конкретные типы асинхронных машин. Эти требования относятся к следующим характеристикам:

1. Отношение начального пускового вращающего момента к номинальному.

2. Отношение минимального вращающего момента в процессе пуска (см. § 23.8, п. 30) к номинальному.

Согласно ГОСТ 183-74 это отношение должно быть не ниже 0,5 номинального, но не менее 0,5 пускового для односкоростных двигателей мощностью до 100 кВт, 0,3 номинального, но не менее 0,5 пускового для односкоростных двигателей мощностью 100 кВт и выше, 0,3 номинального для однофазных и многоскоростных двигателей.

3. Отношение максимального вращающего момента (см. § 23.8, п. 31) к номинальному.

4. Отношение начального пускового тока (см. § 23.8, п. 28) к номинальному.

5. Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности асинхронных электродвигателей.

6. Обозначения выводов обмоток выполняются согласно ГОСТ 183-74 (см. § 23.13).

7. Допустимая кратковременная перегрузка по току регламентируется ГОСТ 183-74 (см. § 23.9, п. 6).

Требования, которым должны соответ-

ствовать асинхронные электродвигатели, сформулированы в следующих стандартах (помимо стандартов, указанных в § 23.20):

ГОСТ 19523-81. Двигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые серии 4А с высотой оси вращения от 50 до 355 мм. Технические условия.

ГОСТ 7217-79. Электродвигатели трехфазные асинхронные. Методы испытаний.

ГОСТ 23131-78. Двигатели трехфазные асинхронные серий АЗ, АКЗ. Технические условия.

ГОСТ 24915-81. Двигатели трехфазные асинхронные напряжением 6000 В, мощностью от 200 до 1000 кВт. Ряды мощностей и установочных размеров.

ГОСТ 9630-80. Электродвигатели трехфазные асинхронные напряжением свыше 1000 В. Общие технические условия.

ГОСТ 185-70. Электродвигатели трехфазные асинхронные крановые. Технические условия.

ГОСТ 20818-75. Двигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые серии 4А с повышенным пусковым моментом и мощностью от 7,5 до 9000 кВт. Общие технические условия.

24.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящем параграфе приводится методика приближенного определения главных размеров (D и l , см. § 23.21) трехфазных асинхронных двигателей, включаемых в сеть с частотой 50 Гц, предназначенных для продолжительного режима работы (см. § 23.8) и имеющих закрытое или защищенное исполнение (см. § 23.7).

В качестве исходных расчетных данных сообщаются номинальная мощность двигателя (мощность на валу) $P_{ном}$, номинальная синхронная частота вращения n_1 или число пар полюсов двигателя p , номинальное линейное напряжение $U_{ном}$ и конструктивное исполнение двигателя (защищенный или закрытый обдуваемый). Спроектированный двигатель по своим свойствам, которые характеризуются КПД, коэффициентом мощности, максимальным вращающим моментом, а короткозамкнутый двигатель — начальным и минимальным пусковыми моментами и начальным пусковым током (см. § 24.3), и во всем остальном должен удовлетворять требованиям действующих стандартов (основные требования стандартов изложены в разд. § 24.3).

Подробные материалы для проектирования асинхронных машин имеются в [24.20—24.22].

1. Расчетная мощность (см. § 23.21)

$$S_p = k_E \frac{P_{ном}}{\eta_{ном} \cos \varphi_{ном}},$$

где $k_E \approx 0,95$ — см. § 23.21; $\eta_{ном}$ — см. табл. 24.1; $\cos \varphi_{ном}$ — см. п. 2.

2. Номинальный коэффициент мощности. Приближенные значения коэффициента мощности равны:

при $P_{ном} = 1 \div 100$ кВт:

для $p = 2$ и $3 \cos \varphi_{ном} \approx \eta_{ном}$;

Таблица 24.1. Ориентировочные значения номинальных КПД асинхронных электродвигателей

Мощность $P_{\text{ном}}$, кВт	Число пар полюсов	КПД
1	1, 2	0,78
2	1, 2	0,82
	3	0,81
5	1, 2	0,86
	3, 4	0,84
10	1, 2	0,88
	3, 4	0,86
20	1, 2, 3, 4	0,89
50	1, 2, 3, 4	0,90
100	1, 2, 3, 4	0,91
200	1, 2, 3, 4	0,92
500	1, 2, 3, 4	0,93
1000	1, 2, 3, 4	0,94

Примечание. В таблице приведены значения КПД трехфазных асинхронных короткозамкнутых двигателей нормального исполнения. У асинхронных двигателей с фазным ротором и короткозамкнутых с улучшенными пусковыми свойствами (см. § 24.11) мощностью до 50 кВт КПД на 2—4 % меньше, чем у короткозамкнутых двигателей нормального исполнения такой же мощности.

для $p=1$ и 4

$$\cos \varphi_{\text{ном}} \approx \eta_{\text{ном}} + \frac{0,6}{\sqrt{P_{\text{ном}} [\text{кВт}]}} (2-p);$$

при $P_{\text{ном}}=100 \div 1000$ кВт

$\cos \varphi_{\text{ном}} \approx \eta_{\text{ном}} - 0,03$.

3. Электромагнитные нагрузки приближенно определяются по табл. 24.2 в соответствии с расчетной мощностью, приходящейся на один полюс $S_p/2p$.

4. Машинная постоянная (см. § 23.21)

$$C_A = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{w1} B_{\delta \text{ном}} A},$$

где α_δ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия; $\alpha_\delta \approx 0,60 \div 0,75$ (см. § 24.6); $k_B \approx 1,09$ (см. § 24.6); $k_{w1} \approx 0,92$ (при $2p=2$ и двухслойной обмотке $k_{w1} \approx 0,75$); $B_{\delta \text{ном}}$, А — см. п. 3.

Таблица 24.2. Ориентировочные значения электромагнитных нагрузок асинхронных электродвигателей

$S_p/2p$, кВт·А		1	2	5	10	20	50	100	200	500
$A \cdot 10^{-4}$, А/м		2,5	3,0	3,4	3,7	4,0	4,4	4,7	5,0	5,3
$B_{\delta \text{ном}}$, Тл	$p=1$	0,65	0,66	0,69	0,70	0,72	0,73	0,74	0,74	0,74
	$p=2$	0,70	0,71	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,80	0,81
	$p=4$	0,71	0,72	0,74	0,75	0,76	0,78	0,79	0,80	0,81

Таблица 24.3. Значения λ асинхронных машин

p		1	2	3	4	5	6
λ	Степень защиты IP44	0,3—0,8	0,7—1,2	0,9—1,6	1,2—2,0	1,4—1,8	1,8—2,1
	Степень защиты IP23	0,2—0,8	0,5—1,2	0,9—1,7	1,3—2,2	1,8—2,7	2,4—3,3

Примечание. Для двигателей со степенью защиты IP44 большие значения λ при $p=1 \div 4$ относятся к машинам с высотой оси вращения $h \leq 250$ мм.

5. Внутренний диаметр сердечника статора

$$D = \sqrt[3]{\frac{4f_1 C_A S_p}{\Omega_1^2 \lambda}},$$

где λ — по табл. 24.3; $f_1=50$ Гц.

6. Расчетная длина сердечника статора

$$l_\delta = \frac{\pi D}{2p} \lambda.$$

24.5. АКТИВНЫЕ И ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

1. Сопротивления статорной обмотки. Активное сопротивление фазы — см. § 23.28, п. 1.

Главное индуктивное сопротивление взаимной индукции первичной обмотки (обмотки статора)

$$x_{12} = \frac{4m_1 f_1}{\pi} \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{k_n \xi k_\delta} \frac{\omega_1 k_{w1} \omega_2 k_{w2} k_{сн}}{p},$$

где k_{w1} , k_{w2} , $k_{сн}$ — обмоточные коэффициенты и коэффициент скоса пазов для основной гармонической индукции магнитного поля (см. § 23.26, п. 4).

Главное индуктивное сопротивление взаимной индукции обмотки (первичной или вторичной) при приведении обмотки ротора к обмотке статора

$$x_{12} = \frac{4m_1 f_1}{\pi} \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{k_n \delta k_\delta} \frac{\omega_1^2 k_{w1}^2}{p}, \text{ или } x_{12} = x_{Г1}$$

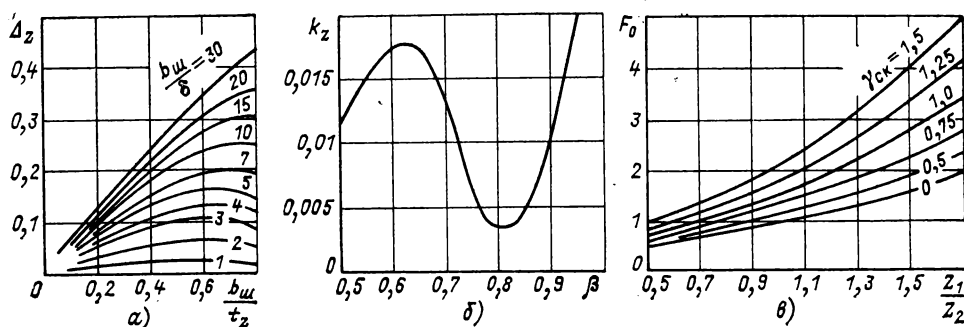
(см. § 23.29).

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки (см. § 23.29, п. 2)

$$x_\sigma = 4\pi \mu_0 f_1 \omega_1^2 \frac{l_\delta \lambda}{pq},$$

где $\lambda = \lambda_{п\psi} + \lambda_d + \lambda_{л\pi}$.

Коэффициент проводимости пазового рассеяния $\lambda_{п\psi}$ рассчитывается по § 23.29, п. 2.

Рис. 24.3. К расчету коэффициента дифференциального рассеяния ξ

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_d = \frac{1}{12} \frac{t_z}{\delta'} \xi,$$

где ξ — коэффициент дифференциального рассеяния (см. § 23.29, п. 2, б) $\delta' = \delta k_\delta$. При практических расчетах коэффициент ξ можно считать равным:

а) для обмоток статора и ротора двигателей с фазным ротором (q — целое)

$$\xi = k_z q^2 + 2k_\beta - k_{w1}^2 (1 + \Delta_z);$$

б) для обмотки статора короткозамкнутого двигателя с открытыми пазами статора и нескошенными пазами ротора

$$\xi \approx \left(2 \frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \Delta_z \right) k_\beta - k_{w1}^2 \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2;$$

в) для обмотки статора короткозамкнутого двигателя с полузакрытыми пазами

$$\xi \approx 2F_0 k_\beta - k_{w1}^2 \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 (1 + \gamma_{ск}^2),$$

где Δ_z — по рис. 24.3, а; k_z — по рис. 24.3, б; F_0 — по рис. 24.3, в; k_β — коэффициент, учитывающий укорочение шага (см. § 23.29, п. 2); $\gamma_{ск} = b_{ск}/t_{z2}$ — скос пазов ротора в долях зубцового деления ротора.

Коэффициент проводимости лобового рассеяния λ_l рассчитывается согласно § 23.29, п. 2, в, причем для токов прямой (обратной) последовательности двухслойных обмоток коэффициент λ_l равен:

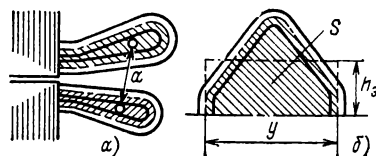
$$\lambda_l^e = \lambda_{11l} - \lambda_{12l},$$

где λ_{11l} и λ_{12l} — коэффициенты проводимости для потоков собственной и взаимной индукции лобовой части обмотки:

$$\lambda_{11l} = k_{pл} k_{\beta л} k_{c1} \lambda_{11l}^e;$$

$$\lambda_{12l} = k_{pл} k_{\beta л} k_{c2} k_a k_h \lambda_{12l}^e;$$

где $k_{pл}$, $k_{\beta л}$, k_a , k_h — коэффициенты (табл. 24.4а, 24.4б, 24.5а и 24.5б), которыми учитывается влияние на лобовое рассеяние соответственно числа пар полюсов, сокращения шага, расстояния a между центрами тяжести поперечных сечений лобовых частей обмоток машин (рис. 24.4, а), отношения эквивалентных

Рис. 24.4. К расчету коэффициента λ_l^e

вылетов h_{a1} и h_{a2} лобовых частей обмоток статора и ротора ($h_a = S/y$; рис. 24.4, б); k_{c1} , k_{c2} — коэффициенты, которыми учитывается влияние на лобовое рассеяние окружающих лобовые части статора и ротора ферромагнитных тел: $k_c = 1$ при открытой машине, $k_c \approx 1,5 \div 1,6$

Таблица 24.4а

2р	2	4	6	8—∞
$k_{pл}$	1,08	1,04	1,0	0,97

Таблица 24.4б

h_{a2}/h_{a1}	0,15	0,4	0,5	0,8	1,0	1,2
k_h	0,57	0,73	0,79	0,94	1,0	1,05

Продолжение табл. 24.4б

h_{a2}/h_{a1}	1,5	2	3	4	5
k_h	1,07	1,12	1,2	1,29	1,36

при расстоянии между ферромагнитными телами и лобовыми частями менее 0,3τ; λ_{11l}^e , λ_{12l}^e — коэффициенты (для трехфазных обмоток с целым числом q_1 — см. табл. 24.6; для дробных обмоток при $q_1 \approx 2 \div 3,5$ $\lambda_{11l}^e \approx 2,5q_1^2$, $\lambda_{12l}^e \approx 1,5q_1^2$).

Таблица 24.5а

β	0,75	0,834	0,918	1
$k_{\beta\lambda}$	0,935	0,965	0,985	1

Таблица 24.5б

a/τ	0,150	0,225	0,30
k_x	1,12	1,0	0,885

Таблица 24.6

q_1	2	3	4	≥ 4
$\lambda'_{11\lambda}$	10,2	22,1	39,2	$2,4 q_1^2$
$\lambda'_{12\lambda}$	6,06	13,0	23,4	$1,45 q_1^2$
$\lambda'_{0\lambda}$	1,62	3,3	4,9	$0,31 q_1^2$

В выражении для λ_λ (§ 23.29, п. 2,в) $l_s = \sqrt{S} \approx 0,6\beta\tau$; S — площадь проекции поверхности, ограниченной лобовой частью, на продолжение внутренней цилиндрической поверхности сердечника.

Для токов нулевой последовательности $\lambda'_\lambda = k_{\beta\lambda} k_{\beta\lambda} k_{c1} \lambda'_{0\lambda}$, где $\lambda'_{0\lambda}$ — см. табл. 24.6 при q_1 целом и $\lambda'_{0\lambda} = 0,38 q_1^2$ для дробных обмоток при $q_1 \approx 2 \div 3,5$.

2. Сопротивления короткозамкнутой обмотки. Активное сопротивление обмотки рассчитывается согласно § 23.28, п. 2.

Коэффициент k_r равен: а) для прямоугольных пазов (см. рис. 23.27, а) $k_r = \psi(\xi)$ и определяется по рис. 23.40; $\xi = \alpha\alpha_0$, — см. § 23.28, п. 1; при $\xi > 2$ $k_r \approx \xi$; б) для клинообразных и

трапецеидальных пазов (см. рис. 23.27, ж) $k_r = \psi(\xi, \eta)$ определяется по рис. 24.5, а, где $\eta = b_{n1}/b_{n2}$; $\xi = \alpha\alpha_0$; в) для круглых пазов с одним шлицем (см. рис. 23.41, в) и с двумя шлицами (см. рис. 23.27, з) k_r определяется соответственно по рис. 24.5, б и в [24.21].

Индуктивное сопротивление рассеяния $x_2 = x_\sigma$ — см. § 23.29.

Коэффициент проводимости пазового рассеяния λ_λ рассчитывается с учетом вытеснения тока. Для стержней короткозамкнутой обмотки ($m_3 = 1$), расположенных в прямоугольных пазах, $k_x = \lambda(\xi)$ и определяется по рис. 23.40. Коэффициент k_x для стержней, расположенных в трапецеидальных (см. рис. 23.27, ж), круглых с одним шлицем (рис. 23.41, в) и круглых с двумя шлицами (рис. 23.27, з) пазах определяется соответственно по кривым на рис. 24.5, а—в.

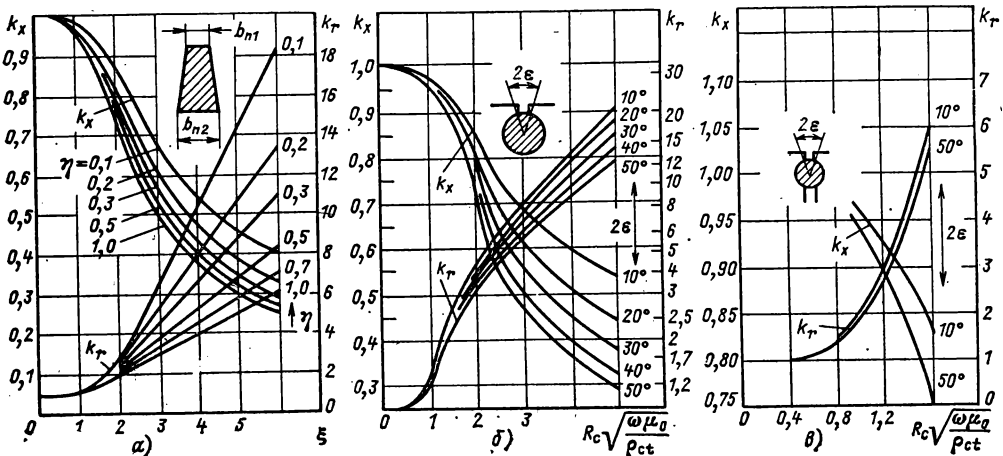
Коэффициент дифференциального рассеяния обмотки (при $Z_2/p > 10$)

$$\xi = 1 - \Delta_z,$$

где Δ_z — по рис. 24.3, а.

Коэффициент проводимости лобового рассеяния λ_λ определяется по коэффициенту λ'_λ , который рассчитывается так же, как и для якорной обмотки (см. п. 1), после фиктивной замены короткозамкнутой обмотки катушечной с шагом, равным шагу якорной обмотки, но с сохранением неизменным вылета обмотки.

3. Активные и индуктивные сопротивления в относительных единицах. Для исследования электрических машин наряду с системой абсолютных единиц используется система относительных единиц, в которой значения всех величин выражаются в долях некоторых значений, принятых за базовые. Применение относительных единиц упрощает уравнения, описывающие процессы в машине, и контроль за расчетными данными. Последнее объясняется тем, что величины (например, сопротивления якорных обмоток), характеризующие электрические машины с сильно различающимися номинальными данными, выраженными в относительных еди-

Рис. 24.5. К расчету коэффициентов k_r и k_x

а — стержень клинообразной формы; б — стержень круглой формы в пазу с одним шлицем; в — стержень круглой формы в пазу с двумя шлицами

ницах, отличаются друг от друга незначительно, тогда как при выражении их в абсолютных единицах они могут отличаться в десятки тысяч раз.

За базовые значения параметров статора принимаются:

напряжение, В, $U_{16} = U_{1\text{ном}}$ (фазное);

ток, А, $I_{16} = I_{1\text{ном}}$ (фазный);

мощность, В·А, $S_{16} = m_1 U_{16} I_{16}$;

сопротивление, Ом, $Z_{16} = U_{16}/I_{16}$.

За базовые значения параметров ротора принимаются:

напряжение, В, $U_{26} = U_{16} \frac{\omega_2 k_{w2}}{\omega_1 k_{w1}}$;

ток, А, $I_{26} = I_{16} \frac{m_1 \omega_1 k_{w1}}{m_2 \omega_2 k_{w2}}$;

мощность, В·А, $S_{26} = S_{16} = m_2 U_{26} I_{26}$;

сопротивление, Ом, $Z_{26} = U_{26}/I_{26}$.

Базовый момент, Н·м, $M_6 = S_{16}/\Omega_1$, где Ω_1 — синхронная угловая скорость поля.

Параметры статора в относительных единицах:

$$U_{1*} = U_1/U_{16}; \quad I_{1*} = I_1/I_{16}; \quad Z_{12*} = Z_{12}/Z_{16};$$

$$P_{1*} = P_1/S_{16} = U_{1*} I_{1*} \cos \varphi_1.$$

Параметры ротора в относительных единицах:

$$U_{2*} = U_2/U_{26} = U_2/U_{16}; \quad I_{2*} = I_2/I_{26} = I_2/I_{16};$$

$$Z_{2*} = Z_2/Z_{26} = Z_2/Z_{16}; \quad P_{2*} = P_2/S_{16}$$

(штрихом сопровождаются величины обмотки ротора, приведенные к обмотке статора, — см. § 24.7, п. 1).

Сопротивления обмоток асинхронной машины в относительных единицах (в скобках указаны сопротивления двигателей мощностью 5—100 кВт):

главное индуктивное сопротивление взаимной индукции

$$x_{12*} = 1,25 \div 4 (2,5 \div 3,5).$$

индуктивное сопротивление рассеяния $x_{1*} \sim x_{2*} = 0,07 \div 0,15$;

активные сопротивления обмоток статора и ротора (без вытеснения тока)

$$r_{1*} \approx r_{2*} = 0,01 \div 0,08 (0,02 \div 0,06)$$

(меньшие значения относятся к крупным машинам, большие — к машинам малой мощности);

активное сопротивление ветви холостого хода схемы замещения (см. § 24.7, п. 2)

$$r_{12*} = 0,1 \div 0,4.$$

24.6. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Магнитной цепью электрической машины называется замкнутый путь, по которому проходит основной поток машины.

Расчет магнитной цепи заключается в определении МДС F_0 (или намагничивающего тока I_0) первичной обмотки (обмотки статора),

под действием которой возникает магнитный поток, индуктирующий в этой обмотке заданную ЭДС $E_{\text{ном}}$.

В силу симметрии магнитной цепи в поперечном сечении (см. рис. 24.1) и равенства магнитных потоков каждой пары полюсов расчет выполняется обычно на один полюс.

Магнитная цепь асинхронной машины рассчитывается при холостом ходе и номинальном напряжении. ЭДС обмотки при холостом ходе незначительно отличается от напряжения на выводах $E_{\text{ном}} = k_E U_{1\text{ном}}$, где $U_{1\text{ном}}$ — номинальное фазное напряжение; $k_E \approx 0,985 - P \cdot 0,00375$ для нормальных асинхронных двигателей. Магнитный поток, необходимый для наведения ЭДС $E_{\text{ном}}$,

$$\Phi = \frac{k_E U_{1\text{ном}}}{4k_B f_1 \omega_1 k_{w1}},$$

где k_B — коэффициент формы кривой индукции (см. § 23.21), определяемый по рис. 24.6 в соответствии с предварительно принятым коэффициентом насыщения зубцового слоя k_z (обычно $k_z = 1,15 \div 1,5$); k_{w1} — см. § 23.26, п. 4.

Магнитная цепь рассчитывается на основании закона полного тока для средней магнитной линии (см. рис. 24.1):

$$\frac{1}{2} \oint H dl = F_0,$$

где H — напряженность магнитного поля; dl — элементарный участок магнитной линии; F_0 — результирующая МДС на один полюс.

На практике интеграл заменяют суммой магнитных напряжений пяти участков, на которые разбивают магнитную цепь таким образом, что в пределах каждого участка напряженность магнитного поля можно считать примерно постоянной:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \oint H dl &= F_0 \approx F_1 + F_2 + \dots + F_5 = \\ &= H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_5 l_5, \end{aligned}$$

где $l_1 = \delta'$ — воздушный зазор (см. рис. 24.1); $l_2 = h_{z1}$ — зубцовая зона статора; $l_3 = L_{a1}$ — ярмо статора; $l_4 = h_{z2}$ — зубцовая зона ротора; $l_5 = L_{a2}$ — ярмо ротора.

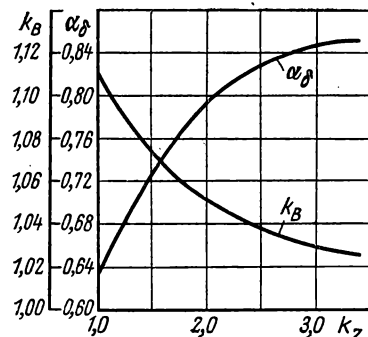


Рис. 24.6. Зависимости $\alpha_\delta = f(k_z)$ и $k_B = f(k_z)$

Максимальная индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \tau l_{\delta}},$$

где α_{δ} определяется по рис. 24.6 в соответствии с коэффициентом k_z , предварительно намеченным при расчете потока Φ (см. выше); l_{δ} — расчетная длина машины (см. § 23.21, 24.4).

Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_{\delta} = H_{\delta} \delta' = \frac{B_{\delta} k_{\delta} \delta}{\mu_0},$$

где $k_{\delta} = k_{\delta 1} k_{\delta 2}$ — см. § 23.26, п. 6.

Магнитное напряжение зубцовой зоны (для статора и ротора определяется одинаковым образом)

$$F_z = H_{zcp} h_z,$$

где H_{zcp} — средняя напряженность поля в зубце:

$$H_{zcp} \approx (H_{z1} + H_{z3} + 4H_{z2})/6;$$

H_{z1} , H_{z2} , H_{z3} — напряженности поля в сечениях зубца b_{z1} , b_{z2} , b_{z3} (рис. 24.7); h_z — высота зубца.

Кажущаяся индукция в сечении b_{zx} (рис. 24.7, а—б)

$$B_{zx} = \frac{B_{\delta} l_{\delta} t_z}{k_c l_m b_{zx}},$$

где $x=1, 2, 3$; l_m — длина сердечника за вычетом радиальных вентиляционных каналов (суммарная длина всех пакетов стали); k_c — коэффициент заполнения пакета сталью (при толщине листов стали 0,5 мм $k_c=0,95$ при нелакированных листах, $k_c=0,93$ при лакированных листах).

Если $B_{zx} < 1,8$ Тл, то зубец не насыщен, в паз отвечает пренебрежимо малая часть магнитного потока зубцового деления и действительная индукция в зубце $B_{zx\delta} = B_{zx}$. Напряженность H_{zx} определяется по основной кривой намагничивания стали по индукции B_{zx} .

Если $B_{zx} > 1,8$ Тл, то часть потока зубцового деления проходит через паз и напряженность поля H_{zx} и действительная индукция определяются при известных индукции B_{zx} и коэффициенте вытеснения потока

$$k_{px} = \frac{b_{px} l_{\delta}}{k_c l_m b_{zx}}$$

по кривым на рис. 24.8 и 24.9, причем кривыми на рис. 24.9 надо пользоваться, если индукция B_{zx} находится за пределами значений,

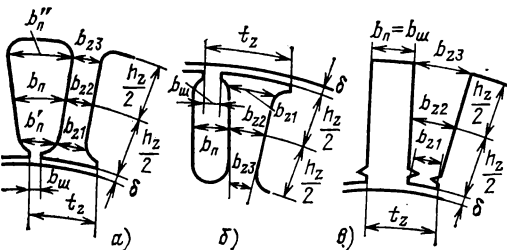


Рис. 24.7. Размеры зубцовой зоны

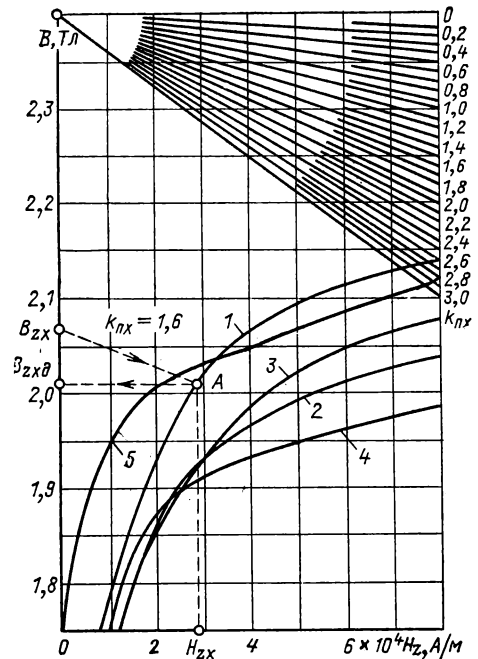


Рис. 24.8. Кривые намагничивания зубцов электрических машин:

1 — 1212 (1311); 2 — 1512 (1513); 3 — роторы турбогенераторов из углеродистой стали с небольшим содержанием никеля; 4 — роторы турбогенераторов из хромоникельмолибденовой стали; 5 — 3413 (вдоль прокатки)

охватываемых кривыми на рис. 24.8. При определении индукции $B_{zx\delta}$ по рис. 24.8 проводят линию $B_{zx}A$ параллельно линии предварительно определенного коэффициента k_{px} .

После определения магнитных напряжений F_{δ} , F_{z1} и F_{z2} рассчитывается коэффициент насыщения зубцового слоя:

$$k_z = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}},$$

и если он отличается от первоначально принятого значения на 10 % и более, то повторяют расчет, задавшись новым значением k_z , более близким к полученному в расчете.

Магнитное напряжение ярма

$$F_a = \xi H_a L_a,$$

где ξ — коэффициент, учитывающий неравномерность магнитного поля в ярье, определяется по рис. 24.10; L_a — участок средней линии ярма: $L_a = \pi(D_a - h_{a1})/2p$ (см. рис. 24.1); напряженность поля H_a определяется по основной кривой намагничивания в соответствии с индукцией B_a .

Максимальная индукция в ярье

$$B_a = \frac{\Phi}{2h'_a l_m k_c},$$

где h'_a — расчетная высота ярма:

$$h'_a = h_a - 2m_a d_a/3;$$

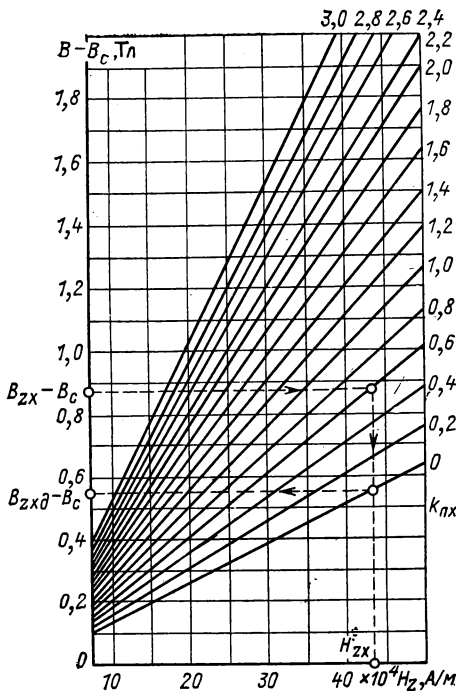


Рис. 24.9. Кривые намагничивания зубцов электрических машин при больших индукциях:

$B_c = 2,04$ Тл для стали 1212 (1311); $B_c = 1,937$ Тл для стали 1512 (1513); $B_c = 1,98$ Тл для роторов турбогенераторов из углеродистой стали с небольшим содержанием никеля; $B_c = 1,885$ Тл для роторов турбогенераторов из хромоникельмолибденовой стали; $B_c = 2,11$ Тл для стали 3413 (вдоль прокатки).

d_a — диаметр аксиального вентиляционного канала (см. рис. 24.1); m_a — число рядов каналов по высоте яра (на рис. 24.1 для статора $m_a = 1$, для ротора $m_a = 2$); l_m — см. выше.

Примечание. При $2p = 2$ требуется более точный расчет значения F_a (см. [24.21]).

Полная МДС машины (на один полюс)

$$F_0 = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_{a1} + F_{a2} = F_\delta k_n,$$

где $k_n = F_0/F_\delta$ — коэффициент насыщения стальных участков магнитной цепи.

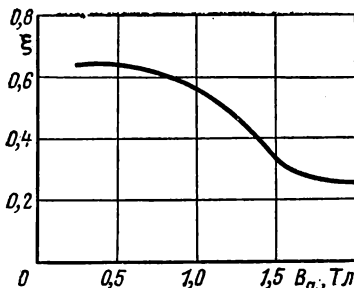


Рис. 24.10. Зависимость $k_n = f(B_a)$

Намагничивающий ток

$$I_r = \frac{\pi r F_0}{\sqrt{2} m_1 w_1 k_{w1}}.$$

При $U_1 \approx \text{const}$ и любой нагрузке, не превышающей номинальную, $E_1 \approx U_1 \approx U_{\text{ном}}$ и $F_0 \approx F_x = \text{const}$, где F_x — амплитуда основной гармонической МДС обмотки статора при синхронной частоте вращения на холостом ходу.

24.7. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ.

СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

1. Основные уравнения. а) ЭДС и МДС обмоток статора и ротора

$$E_1 = 4k_B f_1 w_1 k_{w1} \Phi; \quad E_{2s} = 4k_B s f_1 w_2 k_{w2} k_{\text{ск}} \Phi.$$

Примечание. В асинхронных машинах обычно делают со скосом только пазы ротора.

$$F_1 = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \frac{I_1 w_1 k_{w1}}{p};$$

$$F_2 = \frac{m_2 \sqrt{2}}{\pi} \frac{I_2 w_2 k_{w2}}{p}.$$

б) Уравнения напряжения фаз обмоток статора и ротора (без учета магнитных потерь в стали)

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{Z}_1 \underline{I}_1; \quad \underline{E}_{2s} = r_2 \underline{I}_2 + j s x_2 \underline{I}_2,$$

где $\underline{Z}_1 = r_1 + j x_1$; $-\underline{E}_1 = j(x_{r1} \underline{I}_1 + x_{21} \underline{I}_2)$; x_{12} , x_{11} , x_2 , r_1 , r_2 — см. § 24.5.

в) Уравнение МДС

$$\underline{F}_1 + \underline{F}_2 k_{\text{ск}} = \underline{F}_0;$$

где $k_{\text{ск}}$ — коэффициент скоса для основной гармонической; $F_0 = f(\Phi)$ — см. § 24.6. Коэффициент скоса надо учитывать, так как поле ротора скошено по отношению к статору.

г) Приведение обмотки ротора к обмотке статора. Приведенная обмотка ротора имеет одинаковые с обмоткой статора число фаз, число витков и обмоточные коэффициенты (если на роторе имеется скос пазов, то в приведенной машине скоса пазов нет). Величины приведенной обмотки обозначаются штрихом:

$$E'_2 = E_2 \frac{w_1 k_{w1}}{w_2 k_{w2}} \frac{1}{k_{\text{ск}}};$$

$$I'_2 = I_2 \frac{m_2 w_2 k_{w2}}{m_1 w_1 k_{w1}} k_{\text{ск}};$$

$$r'_2 = r_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 k_{w1}}{w_2 k_{w2}} \right)^2 \frac{1}{k_{\text{ск}}^2};$$

$$x'_2 = x_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 k_{w1}}{w_2 k_{w2}} \right)^2 \frac{1}{k_{\text{ск}}^2}.$$

Примечание. Для обмотки короткозамкнутого ротора $w_2 = 1/2$, $m_2 = 2$, $k_{w2} = 1$.

При переходе к приведенным величинам в уравнении для напряжений фазы обмотки статора с учетом того, что $x_{21} \underline{I}_2 = x_{r1} \underline{I}'_2 = x_{12} \underline{I}'_2$ (см. § 24.5, п. 1), получим

$$-\underline{E}_1 = j x_{12} (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2).$$

д) Индуктивное сопротивление рассеяния скося. При наличии скося пазов ЭДС взаимной индукции уменьшается. В приведенной машине рассеяние за счет основной гармонической поля учитывается введением индуктивного сопротивления рассеяния скося, приведенного к обмотке ротора

$$x'_{ск2} = \left(\frac{1}{k_{ск}^2} - 1 \right) x_{г1}.$$

Суммарное индуктивное сопротивление рассеяния приведенной обмотки ротора складывается из сопротивления x'_2 , определенного по § 24.5, и сопротивления $x'_{ск2}$. Для суммы $x'_2 + x'_{ск2}$ сохраняется обозначение x'_2 .

2. Схемы замещения и векторная диаграмма. а) Запишем уравнения напряжений и токов приведенной асинхронной машины с эквивалентным заторможенным ротором (у которого действительное значение и фаза тока при неизменном магнитном потоке такие же, как и у вращающегося ротора).

Влияние потерь в магнитопроводе учитывается в уравнениях приведенной машины с помощью введения активного сопротивления $r_{12} = P_m / m_1 I_{xT}^2$, где P_m — основные потери в стали (см. § 24.9); $I_{xT} = I_1 + I'_2$.

При этом ЭДС фазы обмотки статора или приведенной обмотки ротора равна $E_1 = E'_{2s} / s = E'_2 = -Z_{12} I_{xT}$; $Z_{12} = r_{12} + jx_{12}$.

Уравнения напряжений и токов

$$\begin{aligned} U_1 &= Z_{12} I_{xT} + Z_1 I_1; \\ 0 &= Z_{12} I_{xT} + Z'_2 I'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s} I'_2; \\ I_1 + I'_2 &= I_{xT}. \end{aligned}$$

Этой системе уравнений соответствуют Т-образная схема замещения (рис. 24.11, а) и векторная диаграмма (рис. 24.12). Сопротивление $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$, а добавочное сопротивление $r'_2 \frac{1-s}{s}$ соответствует механической мощности, развиваемой ротором.

Ток ветви Z_{12} в Т-образной схеме замещения (ток холостого хода с учетом только основных магнитных потерь)

$$I_{xT} = \sqrt{I_r^2 + I_{aT}^2},$$

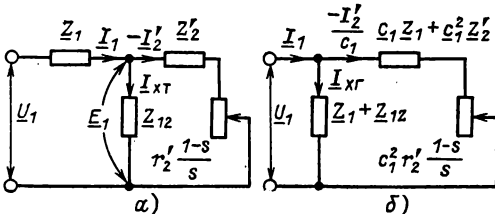
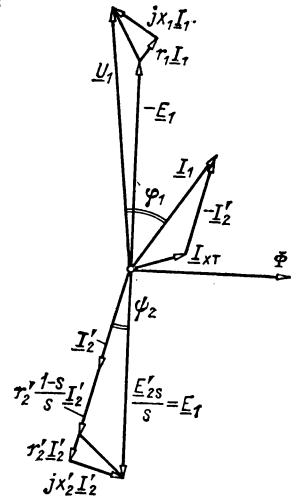


Рис. 24.11. Схемы замещения асинхронной машины

Рис. 24.12. Векторная диаграмма асинхронной машины в двигательном режиме работы



где $I_{aT} = P_m / m_1 E_1$ — активная составляющая тока; I_r — см. § 24.6.

б) Система уравнений, записанная в п. 2, а, может быть преобразована путем замены тока I'_2 на ток I'_2 / C_1 , где

$$C_1 = \frac{Z_1 + Z_{12}}{Z_{12}} = c_1 e^{-j\gamma_1}; \quad c_1 \approx 1 + x_1 / x_{12};$$

$$\gamma_1 = \arctg \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}.$$

$$U_1 = (Z_1 + Z_{12}) I_{xT};$$

$$\begin{aligned} 0 &= (Z_1 + Z_{12}) I_{xT} + (C_1 Z_1 + C_1^2 Z'_2) \frac{I'_2}{C_1} + \\ &+ C_1^2 r'_2 \frac{1-s}{s} \frac{I'_2}{C_1}; \quad I_1 + I'_2 / C_1 = I_{xT}. \end{aligned}$$

Этой системе уравнений соответствует Г-образная схема замещения (рис. 24.11, б).

В машинах мощностью выше нескольких киловатт $\gamma < 1^\circ$ и $c_1 \approx 1,02 \div 1,06$.

Ток ветви Z_{12} в Г-образной схеме замещения [ток идеального холостого хода (при вращении с синхронной скоростью $s=0$) с учетом только основных магнитных потерь]

$$I_{xT} = I_{xT(s=0)} = \frac{U_1}{Z_1 + Z_{12}};$$

$$I_{xT} = \sqrt{I_r^2 + I_{aT(s=0)}^2},$$

где $I_{aT(s=0)} = \frac{P_m + P_{a1x}}{m_1 U_1}$; $P_{a1x} \approx m_1 I_r^2 r_1$ —

электрические потери в обмотке статора при холостом ходе.

3. Основные уравнения асинхронной машины в системе относительных единиц:

$$U_{1*} = -E_{1*} + Z_{1*} I_{1*};$$

$$0 = -E_{1*} + Z_{2*} I_{2*} + r_{2*} \frac{1-s}{s} I_{2*};$$

$$-E_{1*} = Z_{12*} I_{xT*}; \quad I_{1*} + I_{2*} = I_{xT*}.$$

24.8. ОСНОВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ, ВРАЩАЮЩИЕ МОМЕНТЫ, МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Направление потока активной энергии в асинхронной машине зависит от режима ее работы. В двигательном режиме активная мощность потребляется из сети и передается на вал (рис. 24.13, а), в генераторном активная мощность потребляется со стороны вала и отдается в сеть (рис. 24.13, б). Поэтому все мощности, за исключением мощности потерь, имеют в генераторном режиме знак минус, а в двигательном знак плюс.

Потребляемая или отдаваемая активная мощность

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Электрические потери в обмотках статора и ротора

$$P_{\text{эл}} = m_1 I_1^2 r_1; \quad P_{\text{эл}2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'.$$

Основные магнитные потери в сердечнике статора

$$P_M = m_1 I_{\text{хТ}}^2 r_{12}.$$

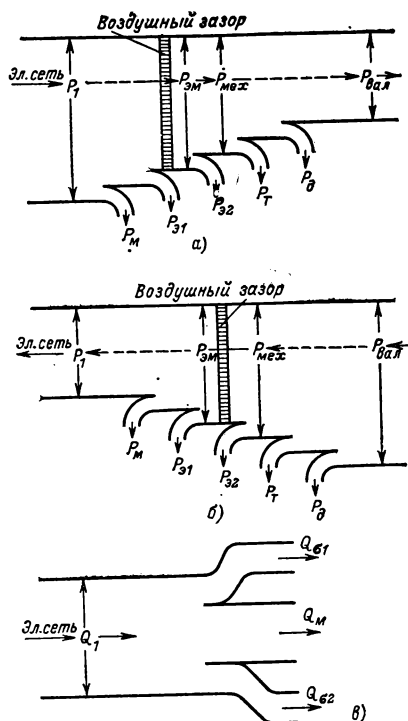


Рис. 24.13. Диаграммы преобразования мощностей в асинхронной машине: активной мощности в режиме работы двигателем (а) и генератором (б), реактивной мощности (в)

Электромагнитная мощность (мощность, передаваемая через воздушный зазор магнитным полем)

$$P_{\text{эм}} = P_1 - (P_{\text{эл}1} + P_M) = M \Omega_1,$$

где M — электромагнитный момент; Ω_1 — синхронная угловая скорость.

Мощности $P_{\text{эм}}$ соответствует на схеме замещения (см. рис. 24.11, а) мощность, выделяемая в активном сопротивлении вторичной цепи — r_2/s :

$$P_{\text{эм}} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}.$$

Механическая мощность, развиваемая ротором,

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} - P_{\text{эл}2} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} = M \Omega.$$

Примечание. При наличии на роторе фазной обмотки потери в переходном контакте щеток следует включить дополнительно в потери $P_{\text{эл}2}$.

Вторичная, или полезная, механическая мощность на валу двигателя P_2 и первичная, или потребляемая, механическая мощность генератора P_2 определяются по механической мощности $P_{\text{мех}}$ с учетом добавочных электрических и магнитных (поверхностных и пульсационных) потерь P_d , механических потерь P_T (потери на трение в подшипниках, щеток о контактные кольца и вентиляционные потери):

$$P_2 = P_{\text{вал}} = P_{\text{мех}} - (P_d + P_T) = M_2 \Omega,$$

где M_2 — полезный вращающий момент на валу; Ω — угловая скорость ротора.

Механическая мощность, развиваемая ротором, и электрические потери в роторе могут быть выражены через электромагнитную мощность и скольжение:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} (1 - s); \quad P_{\text{эл}2} = P_{\text{эм}} s.$$

Диаграммы преобразования активной мощности в асинхронной машине показаны на рис. 24.13, а и б.

Реактивная мощность, потребляемая из сети,

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1.$$

Реактивная мощность, необходимая для создания основного магнитного поля в машине,

$$Q_M = m_1 E_1 I_T = m_1 I_{\text{хТ}}^2 x_{12}.$$

Реактивные мощности, затрачиваемые на образование магнитных полей рассеяния первичной и вторичной обмоток,

$$Q_{\text{с}1} = m_1 I_1^2 x_1; \quad Q_{\text{с}2} = m_2 I_2^2 x_2 = m_1 I_2'^2 x_2'.$$

Баланс реактивных мощностей

$$Q_1 = Q_M + Q_{\text{с}1} + Q_{\text{с}2}.$$

Диаграмма преобразования реактивной мощности в асинхронной машине в режиме работы как двигателем, так и генератором показана на рис. 24.13, в. Независимо от режима работы асинхронная машина всегда потребляет реактивную мощность из сети.

Электромагнитный момент

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} m_1 \omega_1 k_{w1} p \Phi I_2' \cos \psi_2;$$

$$M = \frac{pm_1}{\omega_1} I_2'^2 \frac{r_2'}{s} =$$

$$= \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\omega_1 s \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]},$$

где

$$\cos \psi_2 = \frac{r_2'/s}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_2'^2}};$$

c_1 — см. § 24.7.

Максимальный электромагнитный момент M_{max} и соответствующее ему скольжение (критическое скольжение) $s_{кр}$

$$M_{max} =$$

$$= \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 c_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} \right]};$$

$$M_{max} \approx \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 c_1 (x_1 + c_1 x_2')}$$

(при $r_1 \ll x_1 + c_1 x_2'$);

$$s_{кр} = \pm \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}},$$

где знаки плюс и минус относятся соответственно к режиму работы двигателем и генератором.

Электромагнитный момент, отнесенный к его максимальному значению, при постоянных параметрах (формулы Клосса)

$$\frac{M}{M_{max}} = \frac{2 + \lambda s_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + \lambda s_{кр}};$$

$$\frac{M}{M_{max}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}$$

(при $\lambda s_{кр} \ll 2$; $\lambda s_{кр} \ll \frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}$),

где $\lambda = 2r_1/c_1 r_2'$.

Начальный пусковой электромагнитный момент, развиваемый в момент пуска ($s=1$):

$$M_{\Pi} = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\omega_1 [(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2]} =$$

$$= \frac{pm_1 I_2'^2}{\omega_1}.$$

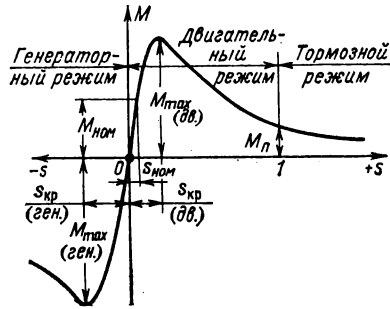


Рис. 24.14. Механическая характеристика асинхронной машины

Расчет момента M_{Π} выполняется с учетом влияния вытеснения тока в пазу ротора на активные и индуктивные сопротивления r_2' и x_2' (см. § 24.5, п. 2) и насыщения на x_1 и x_2' (подробнее — см. [24.21]).

Механическая характеристика машины представляет собой зависимость между моментом M и скольжением s (или частотой вращения n) асинхронной машины при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$; $M = f(s)$ или $s = f(M)$.

Вид механической характеристики при постоянных параметрах машины показан на рис. 24.14. Кратность начального пускового вращающего момента и кратность максимального вращающего момента по отношению к номинальному моменту регламентируются стандартами на конкретные виды асинхронных двигателей. У двигателей общего назначения средней и большой мощности кратности начального пускового и максимального вращающих моментов согласно стандартам равны:

$$M_{\Pi}/M_{ном} = 1,0 \div 2; \quad M_{max}/M_{ном} = 1,7 \div 2,2.$$

24.9. ПОТЕРИ И КПД АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Основные потери в стали (магнитные потери в ядре и зубцах сердечника статора от гистерезиса и вихревых токов, возникающие вследствие изменения основной гармонической потока),

$$P_{\text{м}} = k_{\text{да}} p_{\text{а1}} G_{\text{а1}} + k_{\text{дз}} p_{\text{з1}} G_{\text{з1}},$$

где $G_{\text{а1}}$, $G_{\text{з1}}$ — массы ядра и зубцов сердечника статора, определяемые по их размерам с учетом коэффициента k_c ;

$$p_{\text{а1}} \approx p_{1,0/50} B_{\text{а1}}^2 \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,3};$$

$$p_{\text{з1}} \approx p_{1,0/50} B_{\text{з1}}^2 \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,3};$$

$B_{\text{з1}}$ — индукция в зубце сердечника статора; $p_{1,0/50}$ — удельные потери в стали на единицу массы при частоте 50 Гц и индукции 1 Тл; $k_{\text{да}} \approx 1,6$ при $P_{ном} \leq 250$ кВт; $k_{\text{да}} \approx 1,3$ при $P_{н} > 250$ кВт; $k_{\text{дз}} \approx 1,8$ при $P_{ном} \leq 250$ кВт; $k_{\text{дз}} \approx 1,7$ при $P_{ном} > 250$ кВт.

Примечание. Основными потерями в сердечнике ротора обычно за малостью пренебрегают.

Добавочные потери в стали $P_{м,д}$ при холостом ходе (поверхностные и пульсационные потери в зубцах статора и ротора, вызванные пульсациями потока из-за зубчатости сердечников) могут быть рассчитаны по [24.21].

Механические потери. а) *Потери в подшипниках и вентиляционные.* 1. Двигатели с радиальной вентиляцией:

с радиальными каналами

$$P'_T \approx 1200 \cdot 2p \tau^2 (n_B + 11),$$

где τ — полюсное деление; n_B — число радиальных каналов;

без радиальных каналов

$$P'_T \approx k_T n^2 D^3,$$

где D — внутренний диаметр сердечника статора;

$$\left. \begin{aligned} k_T &= 22 \text{ при } D > 0,25 \text{ м;} \\ k_T &= 18 \text{ при } D \leq 0,25 \text{ м} \end{aligned} \right\} \text{ для } 2p = 2;$$

$$\left. \begin{aligned} k_T &= 25 \text{ при } D > 0,25 \text{ м;} \\ k_T &= 18 \text{ при } D \leq 0,25 \text{ м} \end{aligned} \right\} \text{ для } 2p > 2.$$

2. Двигатели с аксиальной вентиляцией (центробежный вентилятор)

$$P'_T \approx 23n^2 D_a^4.$$

3. Двигатели с внешним обдувом (центробежный вентилятор; $0,1 \text{ м} \leq D_a \leq 0,5 \text{ м}$)

$$P'_T \approx k_T n^2 D_a^4,$$

где $k_T = 47(1 - D_a)$ при $2p = 2$; $k_T = 36$ при $2p > 2$.

Примечание. При осевом вентиляторе потери, определенные в пп. 2 и 3, должны быть уменьшены в 2 раза.

б) *Потери на трение щеток о контактные кольца*

$$P_{т,щ} = 9,81 k_{тр} p_{щ} s_{щ} v_k,$$

где $k_{тр} \approx 0,16$ — коэффициент трения; $p_{щ} = (1,5 \div 2,5) \cdot 10^4 \text{ Па}$ — удельное нажатие щеток; $s_{щ}$ — площадь поверхности скольжения всех щеток, м^2 ; v_k — окружная скорость контактной поверхности колец, м/с .

в) *Полные механические потери*

$$P_T = P'_T + P_{т,щ}.$$

Примечание. Сумму потерь $P_M + P_{м,д} + P_T = P_0$ часто называют потерями холостого хода.

Электрические потери в обмотках. а) *Основные электрические потери в обмотках статора и ротора*

$$P_{\Sigma 1} = m_1 I_{1\text{ном}}^2 r_1; \quad P_{\Sigma 2} = m_2 I_{2\text{ном}}^2 r_2 = m_1 I_{2\text{ном}}'^2 r_2',$$

где r_1, r_2 — активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора при расчетной рабочей температуре (см. § 23.12), определяются согласно § 24.5 при $k_T = 1$.

б) *Потери в переходных контактах щеток (в асинхронных машинах, не имеющих приспособ-*

ления для подъема щеток и замыкания колец накоротко)

$$P_{\Sigma,щ} = m_2 \Delta U_{щ} I_{2к},$$

где $I_{2к}$ — ток кольца; $\Delta U_{щ} = 1 \text{ В}$ для угольных и графитных щеток; $\Delta U_{щ} = 0,3 \text{ В}$ для металлоугольных и металлографитных щеток.

в) *Полные электрические потери*

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_{\Sigma,щ}.$$

Добавочные потери (см. § 23.12)

$$P_d \approx 0,005 P,$$

где для двигателя $P = P_1$ — подводимая мощность, для генератора $P = P_1$ — полезная мощность.

Примечание. Сумму потерь $P_{\Sigma} + P_d = P_K$ часто называют потерями короткого замыкания.

Номинальный КПД асинхронной машины. КПД двигателя

$$\eta_{\text{ном}} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1},$$

где $\Sigma P = P_M + P_{м,д} + P_{\Sigma} + P_T + P_d$ — суммарные потери; $P_1 = P_{1\text{ном}}$ — номинальная первичная мощность (подводимая от сети);

$$P_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} + \Sigma P;$$

$P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность (полезная). **КПД генератора**

$$\eta_{\text{ном}} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1 + \Sigma P},$$

где ΣP — суммарные потери; $P_1 = P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность (полезная отдаваемая в сеть).

24.10. КРУГОВАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

1. Круговая диаграмма. При изменении нагрузки асинхронной машины, но при $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ и постоянных параметрах $r_1, x_1, r_2, x_2, r_{12}, x_{12}$ конец вектора тока $\underline{I}_1$ при построении векторной диаграммы перемещается по окружности. Эту окружность, являющуюся геометрическим местом тока $\underline{I}_1$, вместе с дополнительными построениями, необходимыми для ее исследования, называют круговой диаграммой асинхронной машины (рис. 24.15). Существование круговой диаграммы может быть доказано, исходя из основных уравнений асинхронной машины (см. § 24.7). Круговая диаграмма соответствует Г-образной схеме замещения асинхронной машины. Она может быть построена по опытным или расчетным данным. Каждому значению скольжения соответствует на круговой диаграмме вполне определенная точка. Круговая диаграмма может быть использована для определения рабочих характеристик асинхронной машины при условии, что ее параметры в исследуемых режимах остаются постоянными.

Ток холостого хода при $s=0$

$$I_{xP} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_{12})^2 + (x_1 + x_{12})^2}}.$$

Коэффициент мощности при $s=0$

$$\cos \varphi_{xP} = \frac{r_1 + r_{12}}{\sqrt{(r_1 + r_{12})^2 + (x_1 + x_{12})^2}}.$$

При построении круговой диаграммы вертикально вверх направляют вектор $\underline{U}_1 = \underline{U}_{1\text{ном}}$, под углом φ_{xP} к нему откладывают вектор $\underline{OA}_x = I_{xP}$. Далее, так же как в п. «а», строят отрезок $A_x F = D_a$ и проводят из середины отрезка как из центра окружность. Из произвольной точки F_1 восстанавливают перпендикуляр $F_1 A_1$, на котором откладывают отрезки $F_1 H_1 = A_x F_1 r_{k1}/x_{k1}$ и $F_1 A_1 = A_x F_1 r_{k1}/x_{k1}$, где $r_{k1} \approx r_1 + c_1 r_2$. Через точку A_x и точки H_1 и A_1 проводят линии до пересечения с окружностью в точке H ($s=\infty$) и точке A_k ($s=1$).

в) *Определение по круговой диаграмме величин, характеризующих режим нагрузки машины* (рис. 24.15).

Линия первичной мощности (P_1) — OB .

Линия электромагнитной мощности ($P_{эм}$) или линия электромагнитного момента (M) — $A_x H$.

Линия механической мощности ($P_{мех}$) — $A_x A_k$.

Линия вторичной мощности (P_2) — RA_k .

Масштабы: тока m_I , А/мм; мощности $m_P = m_I U_1 m_I$, Вт/мм; момента $m_M = m_P / \Omega_1$, Н·м/мм.

Для режима нагрузки, соответствующего некоторой точке A на круговой диаграмме:

ток статора $I_1 = m_I \overline{OA}$, А;

ток ротора (приведенный к статору) $I'_2 =$

$= m_I c_1 \overline{A_x A}$, А;

первичная мощность $P_1 = m_P \overline{AB_1}$, Вт;

электромагнитная мощность $P_{эм} =$

$= m_P \overline{AH_1}$, Вт;

электромагнитный момент $M = m_M \overline{AH_1}$, Н·м;

механическая мощность $P_{мех} = m_P \overline{AA_1}$, Вт;

полезная (вторичная) мощность $P_2 =$

$= m_P \overline{AA_2}$, Вт;

коэффициент мощности $\cos \varphi_1 = \overline{AB_1} / \overline{OA}$;

КПД $\eta = P_2 / P_1$;

скольжение $s = \overline{A_1 H_1} / \overline{AH_1}$.

Для более точного определения КПД и скольжения используют дополнительные построения (см., например, [23.1, ч. 2, § 4.6]).

г) *Определение по круговой диаграмме максимального момента, максимальной мощности, перегрузочной способности и кратности пускового момента* (см. рис. 24.15). Максимальный электромагнитный момент $M_{max} = m_M \overline{KH_2}$, Н·м, где $\overline{KH_2}$ — отрезок перпендикуляра KF_3 к диаметру $A_x F$, опущенного из точки K касания окружности касательной, проведенной параллельно линии электромагнитного момента $A_x H$.

Максимальная механическая мощность $P_{мех max} = m_P \overline{GL}$, Вт, где $\overline{GL}$ — отрезок перпендикуляра GF_2 к диаметру $A_x F$, опущенного из

точки G касания окружности касательной, проведенной параллельно линии механической мощности $A_x A_k$.

Если точка A_n соответствует номинальному режиму, то кратность максимального момента, или перегрузочная способность двигателя,

$$k_M = \frac{M_{max}}{M_{ном}} = \frac{\overline{KH_2}}{\overline{AH_3}},$$

где $\overline{AH_3}$ — отрезок перпендикуляра, опущенного из точки A_n на диаметр $A_x F$.

Кратность начального пускового вращающего момента (без учета влияния насыщения стали и вытеснения тока на x_k и r_{k1})

$$k_P = \frac{M_P}{M_{ном}} = \frac{\overline{AKH_4}}{\overline{AH_3}},$$

где $\overline{AKH_4}$ — отрезок перпендикуляра, опущенного из точки A_k на диаметр $A_x F$.

Расчет момента M_n при учете влияния насыщения стали и вытеснения тока производится аналитическими методами (см. § 24.7, 24.8).

2. Рабочие характеристики асинхронного двигателя. Рабочие характеристики асинхронного двигателя, представляющие зависимости P_1 , I_1 , M_2 , $\cos \varphi_1$, n , s , $\eta = f(P_2)$, могут быть построены: 1) по данным аналитического расчета, 2) по экспериментальным данным, 3) по круговой диаграмме. Типичные рабочие характеристики показаны на рис. 24.16.

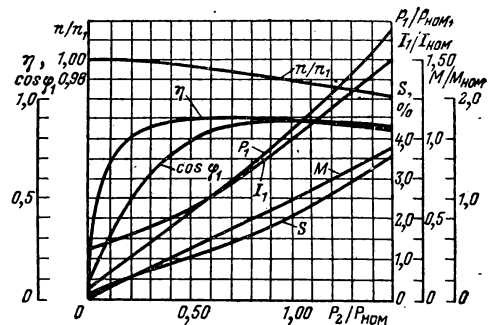


Рис. 24.16. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Вследствие существенного насыщения путей, по которым замыкаются потоки пазового рассеяния (зубцы и коронки зубцов), с увеличением тока сверх номинального на 30—50 % индуктивное сопротивление $x_{k1} = x_1 + c_1 x_2$ уменьшается. С увеличением нагрузки (тока) изменяются скольжение и частота тока ротора, что приводит к изменению поверхностного эффекта и, как следствие, к изменению r_2 и x_2 . Поэтому параметры асинхронных машин можно считать постоянными при небольших перегрузках двигателя.

Точный расчет рабочих характеристик по круговой диаграмме производят лишь для диапазона изменения нагрузки от холостого хода (точка R) до мощности $P_2 \approx (1,3 \div 1,5) P_{ном}$, что соответствует диапазону изменения скольжения $s = 0 \div 0,05$.

24.11. АСИНХРОННЫЕ КОРТОКОЗАМКНУТЫЕ ДВИГАТЕЛИ С УЛУЧШЕННЫМИ ПУСКОВЫМИ СВОЙСТВАМИ

1. *Основные пусковые характеристики асинхронных двигателей.* Пусковые характеристики асинхронных двигателей общепромышленного применения определяются двумя показателями: кратностью начального пускового момента $k_p = M_p / M_{ном}$ и кратностью начального пускового тока $k_I = I_p / I_{ном}$. Для нормального пуска двигателя необходимо, чтобы кратность k_p была достаточно большой ($k_p = 0,7 \div 1$). В то же время кратность тока из соображений экономии электроэнергии и ограничения бросков тока при частых пусках должна быть не выше допустимой ($k_I \leq 5 \div 7,5$). Так как пусковой момент (M_p) и электрические потери в роторе при номинальном режиме ($P_{э2}$) увеличиваются, а пусковой ток (I_p) уменьшается с ростом r_2 , то для повышения k_p , снижения k_I и повышения КПД двигателя при нормальной работе необходимо увеличение активного сопротивления обмотки ротора при пуске и уменьшение его после разбега двигателя. Специальные конструкции короткозамкнутой обмотки ротора, основанные на идее использования эффекта вытеснения тока в стержне при пуске под действием полей пазового рассеяния, позволяют добиться этих целей.

2. *Асинхронный двигатель с глубоким пазом ротора.* Пазы ротора выполняются узкими (3—6 мм) и глубокими (до 60 мм) — см. рис. 23.27, а, б, в. При пуске частота тока в стержне равна частоте сети и индуктивное сопротивление стержня намного больше его активного сопротивления. Нижние слои стержней имеют значительно большее индуктивное сопротивление, чем верхние слои. Поэтому происходит вытеснение тока в верхнюю часть стержня, расположенную ближе к воздушному зазору. Вследствие этого активное сопротивление стержня при пуске возрастает по сравнению с активным сопротивлением при малой частоте тока в роторе (несколько герц), когда вытеснение тока практически отсутствует и индуктивное сопротивление намного меньше активного.

Из-за увеличения пазового рассеяния ротора двигатели с глубокими пазами имеют несколько уменьшенный $\cos \phi$ при нормальной работе и пониженную перегрузочную способность $k_M = M_{max} / M_{ном}$.

3. *Асинхронный двигатель с двойной клеткой ротора.* На роторе двухклеточного двигателя имеются две короткозамкнутые обмотки — рабочая и пусковая. Стержни рабочей обмотки располагаются в нижней части пазов, пусковой обмотки — в верхней (см. рис. 23.27, з). Нижние и верхние части пазов отделяются друг от друга узким шлицем. При выполнении обмотки литой пазы и шлицы заливаются алюминием и обе обмотки практически представляют единое целое. При сварной конструкции обмотки стержни пусковой клетки делают обычно из материала с большим удельным сопротивлением (латунь, режэ — бронза), чем удельное сопротивление стержней рабочей клетки (медь). Частота стержни пусковой клетки имеют и меньшее

сечение, чем стержни рабочей клетки. Минимальное сечение стержней ограничивается допустимыми температурами обмотки. Стержни обеих клеток присоединяются с каждого торца к одному общему или к двум отдельным кольцам.

При пуске частота тока в роторе равна частоте сети, и ток протекает в основном по пусковой обмотке, имеющей меньшее индуктивное сопротивление, чем рабочая обмотка. Так как активное сопротивление пусковой обмотки велико, то это приводит к возрастанию пускового момента.

После разбега двигателя при номинальной или близкой к ней частоте вращения частота тока ротора мала (не более нескольких герц), индуктивные сопротивления стержней становятся намного меньше активных сопротивлений и ток ротора распределяется между обмотками обратно пропорционально их активным сопротивлениям. При сварной конструкции обмотки в случае, если рабочая клетка имеет меньшее сопротивление, ток протекает в основном по этой обмотке. При литой обмотке плотность тока распределяется практически равномерно по всему сечению паза, залитому алюминием.

4. *Асинхронные двигатели с пазами ротора специального профиля.* Помимо обмоток с глубокими пазами и двойных беличьих клеток широкое распространение получили, особенно для быстроходных и мощных двигателей, обмотки со стержнями колбообразного и трапецеидального профиля. При пуске двигателя с медными стержнями колбообразного профиля (см. рис. 23.27, д) ток вытесняется в верхнюю, узкую часть стержня, имеющую большое активное сопротивление. Благодаря этому обеспечивается увеличение пускового момента.

При трапецеидальном профиле паза и стержня (см. рис. 23.27, ж) пусковые свойства двигателя сохраняются такими же высокими, как и при колбообразном профиле. Однако при трапецеидальном профиле стержней удается улучшить теплоотдачу от стержней к стенкам паза, уменьшить вибрацию стержней. Стержни трапецеидального профиля превосходят стержни колбообразного профиля с точки зрения технологии производства.

5. *Сопоставление свойств асинхронных двигателей с обмотками ротора различной конструкции.* На рис. 24.17 показаны пусковые характеристики многофазных асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами трех основных конструктивных типов: со стержнями круглого сечения, с глубокими или трапецеидальными пазами и с двойной беличьей клеткой.

Для сравнения показана также кривая момента асинхронного двигателя с фазной обмоткой на роторе. Штриховкой отмечены области, в пределах которых в зависимости от конкретных особенностей обмотки располагаются характеристики короткозамкнутых двигателей с улучшенными пусковыми свойствами.

Наибольшими пусковыми моментами обладают двигатели с двойной беличьей клеткой (см. п. 3). Однако они в отношении технологии изготовления и надежности эксплуатации уступают двигателям с одной беличьей клеткой.

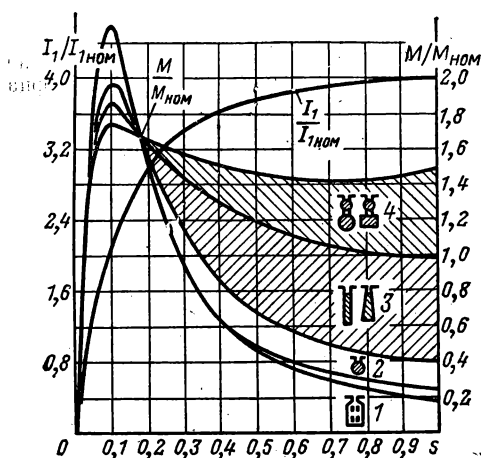


Рис. 24.17. Изменение вращающего момента и тока в зависимости от скольжения у асинхронных двигателей с обмотками ротора различной конструкции:

1 — фазная обмотка; 2 — беличья клетка со стержнями круглого сечения; 3 — беличья клетка со стержнями, расположенными в глубоких или трапецеидальных пазах; 4 — двойная беличья клетка

кой на роторе, расположенной в пазах специального профиля (см. п. 4).

Увеличение пускового момента в короткозамкнутых двигателях указанных конструкций сопровождается в связи с возрастанием индуктивного сопротивления рассеяния x_2 обмотки ротора, снижением максимального момента $M_{\max}$ (на 15—25 %) и коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ (на 4—6 %) по сравнению с аналогичными показателями двигателя с круглыми пазами на роторе.

24.12. ОСОБЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ОСОБЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Асинхронный генератор. Асинхронная машина переходит в генераторный режим работы при вращении ротора с частотой, большей частоты вращения магнитного поля ($n > n_1$) (см. § 24.2), при этом машина отдает активную мощность в сеть и потребляет из сети реактивную мощность, необходимую для образования вращающегося магнитного поля (см. § 23.26). Потребление асинхронным генератором реактивной мощности, вызванное этим снижением гибкости работы энергосистемы и дополнительная нагрузка реактивным током параллельно с ним включенных синхронных машин и сети являются основными недостатками асинхронного генератора, воспрепятствовавшими его широкому распространению.

Асинхронные генераторы выполняются преимущественно с короткозамкнутой обмоткой на роторе. Полезная мощность пропорциональна частоте вращения, которая зависит от мощности приводного двигателя. Обычно $s = (0,01 \div 0,03)$. Частота генератора совпадает с частотой сети.

На круговой диаграмме асинхронной машины (см. рис. 24.15) режим генератора соответствует нижней половине окружности то-

ков, заключенная между точками A_x и F . Режимам, при которых асинхронный генератор отдает активную мощность в сеть, соответствуют точки на дуге окружности токов, расположенной ниже линии OB . Линия RA_k определяет механическую мощность, которая должна быть подведена от приводного двигателя.

Мощность асинхронной машины в режиме генератора больше, чем в режиме двигателя, в отношении $1/\eta_d$, где η_d — КПД двигателя.

Асинхронные генераторы применяются главным образом на малых гидроэлектростанциях, работающих без обслуживающего персонала, так как они могут эксплуатироваться без систем регулирования частоты и напряжения.

Помимо работы параллельно с сетью переменного тока, имеющей источники реактивной мощности, возможна автономная работа асинхронного генератора в режиме самовозбуждения (от потока остаточного магнетизма ротора). Для этого к выводам статора необходимо подключить конденсаторы, которые должны служить источником реактивной мощности Q_1 (рис. 24.18). При работе на активно-

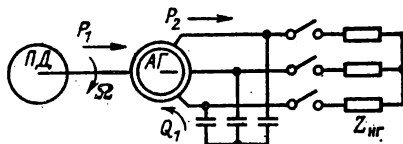


Рис. 24.18. Схема включения асинхронного генератора при работе с самовозбуждением:

АГ — асинхронный генератор; ПД — приводной двигатель; $Z_{нг}$ — внешняя нагрузка

индуктивную нагрузку конденсаторы служат источником реактивной мощности и для нагрузки.

Мощность конденсаторов асинхронного генератора с самовозбуждением близка к номинальной мощности генератора. По этой причине такие генераторы дороги. Они применяются лишь в специальных установках.

Асинхронный преобразователь частоты. Частота ЭДС в роторе асинхронной машины определяется разностью частот вращения ротора и магнитного поля (см. § 24.2).

$$f_2 = sf_1.$$

Поэтому асинхронная машина может использоваться в качестве преобразователя частоты, если питать внешнюю цепь напряжением с частотой f_2 , выведенной с контактных колец.

Асинхронный преобразователь частоты может служить источником напряжения как постоянной, так и переменной частоты f_2 . В первом случае, когда частота f_2 может оставаться постоянной, ротор преобразователя должен вращаться: при $f_2 > f_1$ навстречу полю ($s > 1$), при $f_2 < f_1$ согласно с магнитным полем ($s < 1$).

При генерировании ЭДС частоты $f_2 > f_1$ ротор преобразователя частоты приводится во вращение посторонним двигателем D (обычно асинхронным или синхронным — рис. 24.19, а),

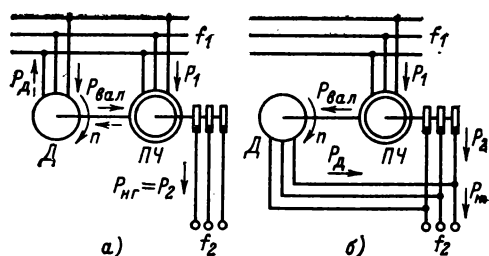


Рис. 24.19. Схема и диаграмма мощностей асинхронного преобразователя частоты:

P_1 , P_2 — первичная и вторичная мощности преобразователя; $P_{Д}$ — мощность, потребляемая (отдаваемая) двигателем; $P_{вал}$ — механическая мощность, передаваемая через вал; $P_{нг}$ — мощность нагрузки

который передает преобразователю частоты ПЧ мощность $P_{вал}$; асинхронная машина-преобразователь работает в режиме тормоза (на рис. 24.19, а сплошными стрелками указаны направления мощностей в этом режиме). При генерировании ЭДС частоты $f_2 < f_1$ ротор преобразователя тормозится электромагнитным моментом машины Д, которая в этом случае работает в генераторном режиме, потребляя электроэнергию либо от той же сети, что и преобразователь (схемы включения см. на рис. 24.19, а, на которой пунктирными стрелками указаны направления мощностей в этом режиме), либо от преобразователя (рис. 24.19, б); асинхронная машина-преобразователь работает в режиме двигателя.

При включении машин Д и ПЧ по схеме рис. 24.19, а

$$f_2 = \frac{p_{Д} \pm p_{П}}{p_{Д}} f_1,$$

где знаки плюс и минус относятся соответственно к режиму работы асинхронной машины тормозом ($f_2 > f_1$) и двигателем ($f_2 < f_1$); $p_{Д}$ и $p_{П}$ — числа пар полюсов асинхронного преобразователя частоты и двигателя (в случае, если в качестве двигателя Д используется асинхронная машина, формула дает приближенное значение частоты f_2 , получаемое при пренебрежении ее скольжением).

Уравнение активных и реактивных мощностей (при пренебрежении потерями):

при включении по схеме рис. 24.19, а

$$P_2 = sP_1; Q_2 = sQ_1; P_{Д} = (1 - 1/s) P_2;$$

при включении по схеме рис. 24.19, б

$$P_2 = P_1; Q_{нг} = sQ_1 - Q_{Д}; P_{Д} = (1 - 1/s) P_{нг}.$$

Для плавного регулирования частоты f_2 необходимо регулировать или частоту f_1 , или частоту вращения приводного двигателя.

Асинхронные преобразователи частоты применяются преимущественно для получения переменного напряжения с частотой 100—200 Гц, необходимого для питания асинхронного привода с частотами вращения выше 3000 об/мин (электропилы и другие ручные электрические машины).

Фазорегулятор. При заторможенном роторе асинхронной машины сдвиг между вектора-

ми ЭДС E_1 и E_2 , которые индуктируются в фазах обмоток статора и ротора, определяется электрическим углом β взаимного сдвига осей фаз, так как обе ЭДС индуктируются одним вращающимся магнитным потоком. Изменение угла сдвига β приводит к изменению фазы ЭДС E_2 .

Такая возможность регулирования фазы ЭДС E_2 используется в фазорегуляторе, который представляет собой трехфазную асинхронную машину с контактными кольцами с заторможенным ротором (рис. 24.20, а). Обмотка

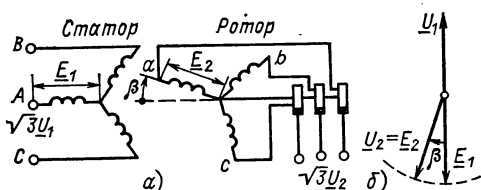


Рис. 24.20. Схема и векторная диаграмма напряжений фазорегулятора

статора присоединяется к сети, к обмотке ротора через контактные кольца присоединяется нагрузка. Ротор может поворачиваться относительно статора с помощью механической передачи. Если пренебречь активными сопротивлениями и индуктивными сопротивлениями рассеяния обмоток статора и ротора, то $U_1 = -E_1$, $U_2 = E_2$ и при идентичности обмоток ($\omega_1 = \omega_2$; $k_{w1} = k_{w2}$) $E_1 = E_2$. Векторная диаграмма для этого случая показана на рис. 24.20, б. При повороте ротора вектор $U_2 = E_2$ также поворачивается относительно вектора $U_1 = -E_1$.

Трехфазный индукционный регулятор. Для плавного регулирования напряжения может быть использована трехфазная асинхронная машина, если выполнить электрическое соединение обмотки статора с фазной обмоткой заторможенного ротора (рис. 24.21). Первичная

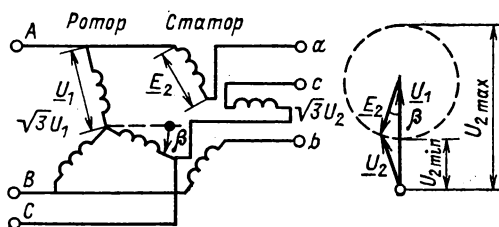


Рис. 24.21. Схема и векторная диаграмма напряжений трехфазного индукционного регулятора

обмотка, которую обычно располагают на роторе, включается в сеть с фазным напряжением U_1 . Вращающийся магнитный поток, созданный током этой обмотки, наводит в ней ЭДС E_1 и во вторичной обмотке ЭДС E_2 . Напряжение фазы вторичной обмотки, если пренебречь сопротивлением этой обмотки, равно геометрической сумме напряжения сети U_1 и ЭДС E_2 : $U_2 = U_1 + E_2$. Угол сдвига β между

векторами $\underline{U}_1$ и $\underline{E}_2$, а следовательно, и напряжение $\underline{U}_2$ зависят от электрического угла взаимного сдвига осей фаз обмоток статора и ротора. При повороте ротора концы векторов $\underline{E}_2$ и $\underline{U}_2$ перемещаются по окружности. Минимальному и максимальному напряжениям U_2 соответствуют углы поворота $\beta=0^\circ$ и $\beta=180^\circ$:

$$U_{2\min} = U_1 - E_2; \quad U_{2\max} = U_1 + E_2.$$

Если не учитывать сопротивлений первичной обмотки r_1 и x_1 , то $U_1 = E_1$. Соотношение

между ЭДС, наведенными в первичной и вторичной обмотках, определяется выражением

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_{w1}}{w_2 k_{w2}}.$$

Первичная обмотка индукционного регулятора может соединяться либо в звезду, либо в треугольник. Для поворота ротора в конструкции индукционного регулятора предусматривается червячная передача. Привод ротора индукционных регуляторов средней и большой мощности осуществляется от электродвигателей.

Б. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

24.13. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СИНХРОННЫХ МАШИН

Синхронные машины широко используются в промышленности в качестве генераторов электрической энергии. Преобладающая часть электрической энергии производится с помощью синхронных трехфазных *турбогенераторов и гидрогенераторов*. Первые приводятся во вращение паровыми турбинами, вторые — гидротурбинами. Для питания автономных нагрузок используются синхронные генераторы с приводом от других типов двигателей (дизельных, внутреннего сгорания и др.).

Генерирование исключительно реактивной мощности осуществляется с помощью синхронных машин, называемых *синхронными компенсаторами*.

Синхронные машины применяются также и в качестве *двигателей*, особенно в крупных установках. В настоящее время существует большое многообразие синхронных электрических машин, отличающихся по назначению, области применения, а следовательно, и по конструктивному исполнению. Основные, наиболее распространенные типы синхронных машин указаны в табл. 24.7 и 24.8.

Т а б л и ц а 24.7. Синхронные генераторы (основные типы)

Турбогенераторы	Неявнополюсные, предназначенные для сопряжения с паровыми или газовыми турбинами. Обычно двухполюсные с частотой вращения 3000 об/мин и мощностью до 1200 МВт. При мощности до 12 МВт выпускаются с воздушным охлаждением, при больших мощностях — с водородным. В турбогенераторах мощностью более 100 МВт применяется непосредственное охлаждение проводов обмоток водородом при избыточном давлении до 0,3–0,4 МПа, дистиллированной водой или трансформаторным маслом
Гидрогенераторы	Явнополюсные, предназначенные для сопряжения с гидравлическими турбинами. Обычно многополюсные с частотами вращения от 50 до 500 об/мин (иногда до 1000 об/мин) мощностью до 700 МВ·А. Рассчитаны на угонную частоту вращения 1,8–3,5 номинальной
Синхронные компенсаторы	Трехфазные машины, предназначенные для генерирования реактивной мощности. Обычно явнополюсные с частотами вращения 750–1000 об/мин. При мощности до 25 МВ·А выполняются с воздушным охлаждением, при больших мощностях — с водородным
Трехфазные синхронные генераторы общего назначения	Предназначены для сопряжения с поршневыми двигателями. Рассчитаны на угонную частоту вращения 1,2 номинальной. Выполняются на мощность от нескольких киловатт до нескольких десятков тысяч киловатт при частотах вращения от 100 до 1500 об/мин
Индукторные генераторы	Однофазного или трехфазного тока с расположением обмоток переменного и постоянного тока только на статоре. Выпускаются на мощность до нескольких сотен киловатт. При частотах вращения 1500–3000 об/мин дают возможность получить ток частотой 2000–10 000 Гц (иногда до 50 000 Гц). Применяются для высокочастотного нагрева и других целей
Генераторы с постоянными магнитами	Обычно трехфазные без обмотки возбуждения (иногда с обмоткой, образующей дополнительное подмагничивание). При частотах вращения 5000–25 000 об/мин выполняются мощностью от нескольких ватт до 10 кВт и более
Однофазные синхронные генераторы	Выполняются на мощность в несколько киловатт (иногда для целей электрической тяги до мощности 50 000 кВт). При одинаковых главных размерах мощность однофазного генератора составляет около 70 % мощности трехфазного генератора при меньшем КПД

Т а б л и ц а 24.8. Синхронные двигатели (основные типы)

Трехфазные синхронные двигатели	Выпускаются на мощность от 20–30 кВт до нескольких десятков тысяч киловатт при частотах вращения от 100 до 1000 об/мин в явнополюсном исполнении, при 1500, 3000 об/мин — в неявнополюсном исполнении. Имеют вентильную или электромагнитную систему возбуждения. Коэффициент мощности обычно 0,9 (при перевозбуждении). Имеют на роторе дополнительную короткозамкнутую обмотку, позволяющую осуществлять асинхронный пуск
Реактивные синхронные двигатели	Самые распространенные синхронные двигатели небольшой мощности (от долей ватта до нескольких киловатт). Выпускаются в трехфазном и однофазном (конденсаторном) исполнении. Не имеют обмотки возбуждения на роторе

Продолжение табл. 24.8

Асинхронизированные синхронные двигатели

Гистерезисные синхронные двигатели

Двигатели с постоянными магнитами

Двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения

Шаговые двигатели

По конструкции напоминают асинхронные двигатели с фазным ротором. Имеют две обмотки на роторе, которые в асинхронном режиме питаются токами частоты скольжения. В результате машина не выпадает из синхронизма. Применяются для работы с тяжелыми условиями пуска и эксплуатации. Выполняются на мощность от 20 до 5000 кВт.

Выпускаются в трехфазном или однофазном исполнении без обмоток возбуждения на роторе на мощности до 500 Вт. Обладают хорошими пусковыми свойствами. Работают бесшумно. Могут иметь несколько синхронных частот вращения.

Выпускаются в трехфазном или однофазном исполнении без обмотки возбуждения на роторе на мощность от долей ватт до нескольких десятков ватт. Имеют высокие КПД и cos ϕ .

Принцип действия основан на взаимодействии зубцовых гармоник поля. Позволяют получать низкие частоты вращения. Применяются в устройствах автоматики и при использовании источников питания повышенной частоты.

Питаются импульсами электрической энергии, под воздействием которых совершают угловое или линейное перемещение на величину шага. Применяются в системах автоматического регулирования.

24.14. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРЕХФАЗНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Устройство синхронной машины

Статор синхронной машины принципиально устроен так же, как и статор асинхронной машины (см. § 24.2, п. 1). В пазах статора размещается многофазная (обычно трехфазная) $2p$ -полюсная обмотка. Фазы обмотки соединяются обычно в звезду (Δ). При наружном диаметре более 1 м сердечник статора собирается из сегментов. На роторе, вал которого опирается на подшипники, располагается обмотка возбуждения, имеющая такое же число полюсов $2p$, как и обмотка статора. Обмотка возбуждения питается постоянным током через

два контактных кольца и щетки от постороннего источника (системы возбуждения). Обмотка возбуждения создает магнитное поле возбуждения. Конструкция ротора существенно зависит от частоты вращения машины. При $n < 1500$ об/мин (соответственно $2p > 4$ при $f = 50$ Гц) применяется явнополюсное исполнение (явно выраженные полюсы) — рис. 24.22. При $n = 3000$ (1500) об/мин, т. е. при $2p = 2$ (4), применяется неявнополюсное исполнение (неявно выраженные полюсы) — рис. 24.23.

Сердечник явнополюсного ротора состоит из полюсов и обода, к которому они прикрепляются. Полюсы обычно собираются из штампованных листов стали марки Ст3 толщиной 1–2 мм, которые стягиваются коваными или литыми нажимными щеками. В отдельных случаях применяются массивные литые полюсы.

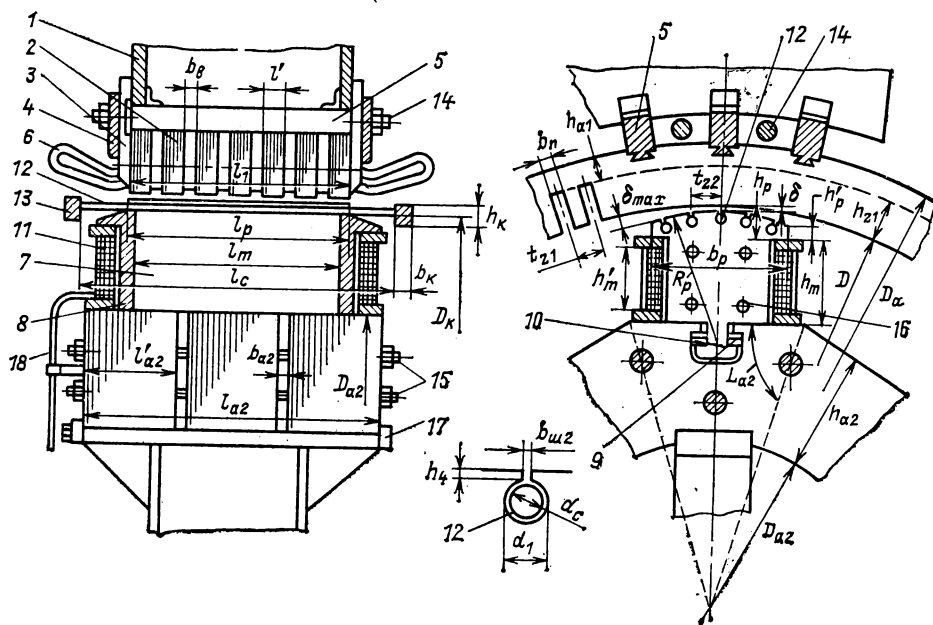


Рис. 24.22. Размеры и устройство синхронной машины (ротор явнополюсный):

1 — станина (корпус статора); 2 — пакет сердечника статора; 3 — пальцы нажимной гребенки; 4 — нажимные плиты; 5 — брусок с хвостом для насадки сегментов сердечника; 6 — обмотка статора; 7 — сердечник полюса; 8 — нажимная щека полюса; 9 — встречные клинья; 10 — хвост полюса (Т-образный); 11 — катушка обмотки возбуждения; 12 — стержень успокоительной (демпферной) обмотки; 13 — короткозамыкающий сегмент (или кольцо) успокоительной обмотки; 14–16 — шпильки, стягивающие сердечники статора, яра ротора и полюсов; 17 — осто́в ротора; 18 — выводы обмотки возбуждения к контактным кольцам

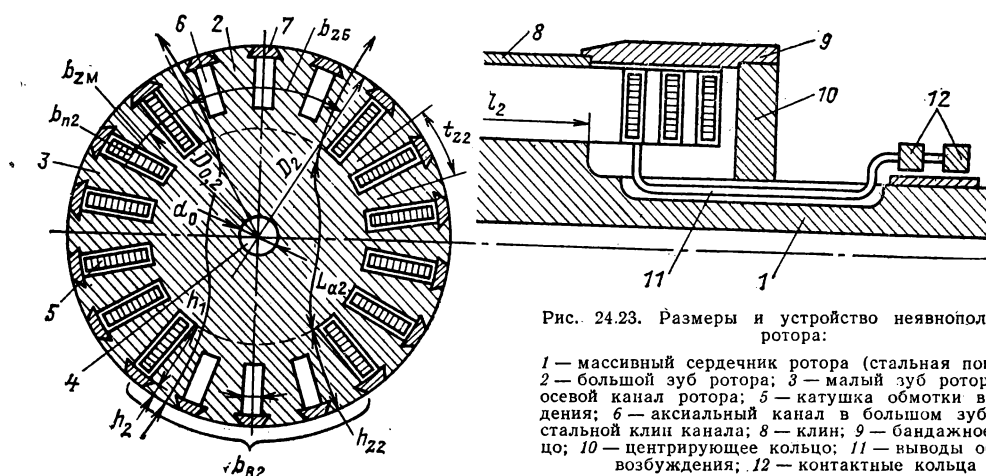


Рис. 24.23. Размеры и устройство неявнополюсного ротора:

1 — массивный сердечник ротора (стальная поковка); 2 — большой зуб ротора; 3 — малый зуб ротора; 4 — осевой канал ротора; 5 — катушка обмотки возбуждения; 6 — аксиальный канал в большом зубе; 7 — стальной клин канала; 8 — клин; 9 — бандажное кольцо; 10 — центрирующее кольцо; 11 — выводы обмотки возбуждения; 12 — контактные кольца

Полюсы крепятся к ободу с помощью либо болтов (машины малой и средней мощности с массивным ободом), либо полюсных хвостов Т-образной (рис. 24.22) или иной формы. На каждом полюсе устанавливается катушка обмотки возбуждения (см. рис. 23.24).

Обод ротора выполняется массивным (сварным, литым) или шихтованным из штампованных листов стали марки Ст3 толщиной 1,5—6 мм (если листы штампуются) и до 100 мм (если листы вырезаются пламенем газовой горелки). Листы стягиваются шпильками. При малом наружном диаметре (до 2—4 м) обод изготавливается из сплошных листов и насаживается непосредственно на вал. При большом диаметре обод собирается из отдельных сегментов, которые крепятся на сварном остоле. Для улучшения вентиляции машин, имеющих значительную осевую длину, обод выполняется подразделенным на несколько пакетов, между которыми имеются каналы для прохождения охлаждающего воздуха к периферийным зонам ротора. Для крепления обмотки возбуждения полюсные наконечники имеют выступы. Для этих же целей используются межполюсные распорки. Для обеспечения более устойчивой работы в переходных режимах на роторе устанавливается демпферная обмотка (см. § 23.25).

Сердечник неявнополюсного ротора (рис. 24.23) изготавливается как единое целое с хвостовиками (концами вала) из одной поковки из углеродистой (диаметром до 800 мм) или легированной (диаметром свыше 800 мм) стали. Обмотка возбуждения распределяется по нескольким пазам ротора (см. § 23.24). Для защиты лобовых частей обмотки возбуждения от действия центробежных сил применяют бандажные кольца, изготавливаемые для крупных турбогенераторов из немагнитной стали (или титана) с высокими механическими свойствами. Бандажное кольцо жестко сопрягается с сердечником или хвостовиком. Обмотка в пазах ротора удерживается немагнитными дюралевыми клиньями (рис. 24.23). Роль демпферной обмотки в неявнополюсных машинах играют массив ротора и проводящие клинья.

Принцип действия синхронной машины

При работе синхронной машины в качестве генератора возбужденный ротор приводится во вращение с частотой n внешним механическим вращающим моментом (например, моментом гидравлической или паровой турбины). Ток обмотки возбуждения I_f создает МДС F_f и магнитный поток, неподвижный относительно полюсов и замыкающийся через сердечник статора. Вращающимся потоком возбуждения в обмотке статора индуцируется ЭДС частоты $f = pn/60$. Электродвижущие силы фаз трехфазной обмотки взаимно смещены во времени на электрический угол 120° . Если к обмотке статора присоединить симметричную нагрузку, то под действием ЭДС в ней и во внешней цепи будет протекать симметричная система токов I_A, I_B, I_C , которые создают МДС якоря F_A и магнитное поле, вращающиеся со скоростью Ω , т. е. синхронно с ротором (см. § 23.26, п. 1). Результирующий вращающийся магнитный поток Φ образуется в результате совместного действия взаимно неподвижных МДС F_f и F_A (рис. 24.24).

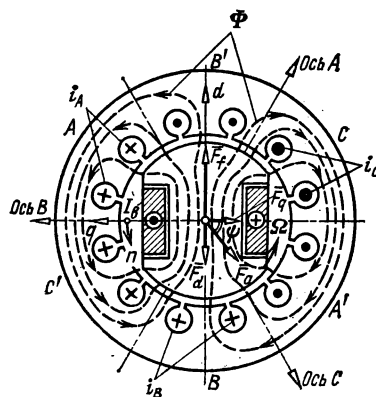


Рис. 24.24. К объяснению принципа действия трехфазной синхронной машины ($2p=2$)

В результате взаимодействия потока Φ с током обмотки якоря возникает электромагнитный момент $M \sim \Phi I \cos \varphi$, где $I = I_A = I_B = I_C$, φ — угол сдвига фаз напряжения $\underline{U}$ и тока $\underline{I}$ генератора. В генераторном режиме электромагнитный момент действует навстречу внешнему вращающему моменту, т. е. является тормозящим.

При работе синхронной машины в качестве двигателя обмотка статора подключается к трехфазной сети переменного тока, а обмотка ротора — к источнику постоянного тока. Обмотка статора создает вращающееся магнитное поле. В результате взаимодействия этого поля с полем обмотки возбуждения возникает электромагнитный вращающий момент, под действием которого ротор вращается с синхронной частотой. В установившемся режиме электромагнитный момент уравнивается внешним тормозящим механическим моментом.

Равенство частот вращения магнитного поля и ротора принципиально характерно для рассматриваемых машин и послужило причиной наименования их синхронными.

Примечания: 1. Обмотку переменного тока синхронной машины называют также обмоткой якоря, или якорной обмоткой, а часть машины, на которой уложена эта обмотка, — якорем. Магнитную систему, на которой располагается обмотка возбуждения, называют также индуктором.

2. Наиболее распространено такое исполнение синхронных машин, когда якорь является внешней частью машины и он неподвижен, а индуктор вращается. Однако машины малой мощности иногда выполняют с неподвижным внешним индуктором и вращающимся якорем.

24.15. СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

Характеристики системы возбуждения определяются сочетанием свойств источника питания обмотки возбуждения и устройств автоматического регулирования. Системы возбуждения должны обеспечивать: 1) надежное питание обмотки ротора синхронной машины во всех режимах, в том числе и при авариях; 2) устойчивое регулирование тока возбуждения при изменении нагрузки в пределах номинальной; 3) достаточное быстродействие; 4) форсировку возбуждения.

Принципиальная схема возбуждения крупной синхронной машины показана на рис. 24.25.

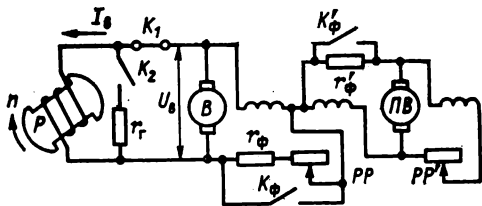


Рис. 24.25. Принципиальная схема возбуждения крупной синхронной машины

P — ротор генератора; B — возбудитель; PB — подвозбудитель; PP и PP' — регулировочные реостаты; K_ϕ и K'_ϕ — контакторы, закорачивающие резисторы; r_ϕ и r'_ϕ — резисторы для осуществления форсировки возбуждения; K_2 — контактор, включающий обмотку возбуждения на гасительный резистор r_r ; K_1 — контактор, размыкающий цепь возбуждения после включения контактора K_2 ; K_1 и K_2 объединяются в автомат гашения поля (АГП)

Важным параметром системы возбуждения является *номинальная скорость нарастания напряжения возбуждения*, которая определяется по формуле

$$v_{\text{ном}} = 0,632 \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} t_1},$$

где $U_{\text{п}}$ — предельное напряжение возбуждения; $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение возбуждения; t_1 — время нарастания напряжения возбуждения.

Время t_1 определяется по кривой нарастания напряжения возбудителя как время, в течение которого это напряжение возрастает от значения, равного номинальному напряжению возбуждения возбуждаемой машины, до

$$U' = U_{\text{ном}} + 0,632 (U_{\text{п}} - U_{\text{ном}}).$$

Кратностью предельного установившегося напряжения возбуждения синхронных машин (кратность форсировки) называется отношение наибольшего установившегося значения напряжения возбуждения к номинальному напряжению возбуждения синхронной машины.

Номинальным напряжением возбуждения электрической машины называется напряжение на выводах или контактных кольцах обмотки возбуждения при питании ее номинальным током возбуждения и сопротивлении обмотки, приведенном к расчетной рабочей температуре (см. § 23.8).

Системы возбуждения классифицируются в зависимости от источника питания обмотки возбуждения.

Систему возбуждения называют *зависимой*, если она питается от главной или дополнительной обмотки якоря возбуждаемого генератора, и *независимой*, если она питается от других источников (от шин собственных нужд станции, от возбудителя или вспомогательного генератора).

Среди независимых систем возбуждения различают:

а) прямые системы возбуждения, в которых ротор возбудителя или вспомогательного генератора находится на одном валу с ротором синхронного генератора (рис. 24.26, а, б) или сопрягается с ним редуктором скорости;

б) косвенные системы возбуждения, в которых ротор возбудителя или вспомогательного генератора приводится во вращение синхронным или асинхронным двигателем, специально установленным для этой цели.

До 60-х годов преимущественное распространение имели *прямые электромашинные системы возбуждения*, в которых обмотка возбуждения синхронной машины питается от коллекторного генератора постоянного тока — возбудителя (рис. 24.25, 24.26, а).

В соответствии с ГОСТ 533-76, ГОСТ 5616-81 и ГОСТ 609-75 турбо- и гидрогенераторы и синхронные компенсаторы могут иметь только обладающие наибольшей надежностью прямую систему возбуждения или систему самовозбуждения. Предельная мощность электромашинных возбудителей при частоте вращения 3000 об/мин составляет примерно 600 кВт. Поэтому электромашинные системы возбуждения не могут применяться в турбогенераторах мощностью 200 МВт и выше, у которых мощность возбуждения превышает 800—1000 кВт.

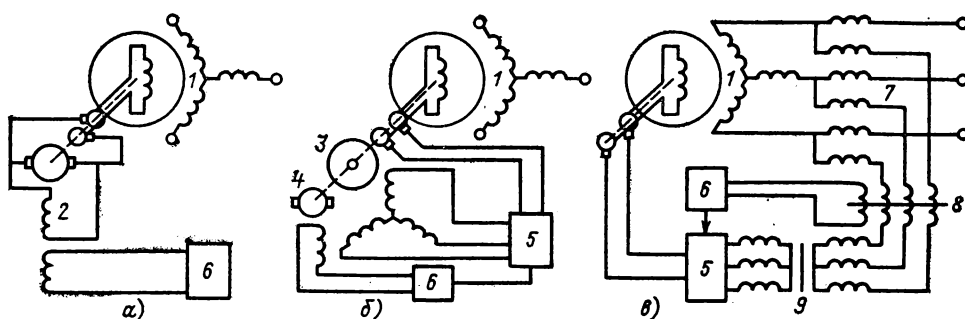


Рис. 24.26. Системы возбуждения синхронных машин:

а — прямая электромашинная; б — прямая с использованием выпрямителей; в — система самовозбуждения; 1 — синхронный генератор; 2 — возбудитель постоянного тока; 3 — вспомогательный генератор; 4 — подвозбудитель вспомогательного генератора; 5 — управляемый выпрямитель; 6 — регулятор возбуждения; 7 — токовый трансформатор; 8 — управляемый от регулятора возбуждения реактор; 9 — трансформатор

По мере освоения производства и повышения надежности полупроводниковых выпрямителей все большее распространение получают *вентильные системы возбуждения* с кремниевыми диодами или тиристорами.

В настоящее время они применяются не только для синхронных двигателей и генераторов небольшой мощности, но и для крупных турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, в том числе и для установок предельных мощностей.

Различают три основные разновидности вентильных систем возбуждения.

1. *Система самовозбуждения* (рис. 24.26, в), в которой необходимая для возбуждения синхронной машины энергия отбирается от главной или дополнительной обмотки якоря (зависимая вентильная система). Выпрямление переменного тока осуществляется с помощью тиристоров. Отбор энергии осуществляется с помощью трансформаторов 9 и 7, включенных соответственно параллельно и последовательно с обмоткой статора. Трансформатор 7 позволяет обеспечить форсирование возбуждения при близких коротких замыканиях, когда напряжение на обмотке якоря существенно снижается. Система самовозбуждения имеет по сравнению с другими системами более высокую надежность и меньшую стоимость из-за отсутствия в ней возбудителя или вспомогательного генератора.

2. *Независимая вентильная система возбуждения* (рис. 24.26, б), в которой энергия, необходимая для питания обмотки возбуждения, получается от вспомогательного синхронного генератора, ротор которого укреплен, как правило, на валу главного генератора. В схемах выпрямителей в этом случае используются полупроводниковые вентили (кремниевые диоды или тиристоры), собранные по трехфазной мостовой схеме. При регулировании возбуждения генератора используются одновременно возможности управления выпрямителями и возможности изменения напряжения вспомогательного генератора.

3. *Бесщеточная система возбуждения*, которая является одной из разновидностей прямых независимых вентильных систем возбуждения. От системы рис. 24.26, б она отличается тем, что имеет обращенный вспомогательный

генератор, у которого обмотка переменного тока 3 размещается на роторе. Выпрямитель 5, получающий питание от этой обмотки, расположен на валу главного генератора. Преимуществом данной системы является отсутствие скользящих контактов, которые в мощных турбогенераторах должны быть рассчитаны на тысячи ампер.

24.16. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СИНХРОННЫМ МАШИНАМ. СТАНДАРТЫ НА СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Общие требования, которые предъявляются к различным типам электрических машин и, в частности, к синхронным машинам, изложены в разд. 23. Здесь приводятся требования, относящиеся только к синхронным машинам общего назначения.

1. Общие требования (по ГОСТ 183-74).

а) Номинальный коэффициент мощности синхронных машин при частоте 50 Гц должен быть 0,8 (при отстающем токе) для синхронных генераторов, 0,9 (при опережающем токе) для синхронных двигателей.

б) Номинальная скорость нарастания напряжения возбуждения синхронных генераторов (в долях номинального напряжения возбуждения в 1 с) должна быть не менее 0,8. (Для возбудителей турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов — см. ниже).

в) Кратность предельного установившегося напряжения возбуждения синхронных машин должна быть не менее 1,4. По заказу потребителя эта кратность может быть больше, но не выше 1,8.

г) Синхронные машины должны выдерживать симметричные и несимметричные внезапные короткие замыкания на выводах обмотки статора при номинальной нагрузке и напряжении, равном 105 % номинального.

д) Кратность максимального вращающего момента (отношение максимального вращающего момента к номинальному) синхронных двигателей должна быть не ниже 1,65 при номинальных значениях напряжения сети, час-

тоты, тока возбуждения и при соединении обмоток, соответствующем номинальному режиму работы двигателя; при наличии быстродействующих систем возбуждения — не ниже 1,5.

е) Допускаемые отклонения напряжения и частоты от номинальных значений см. в § 23.9, п. 4.

2. Требования к гидрогенераторам (по ГОСТ 5616-81).

а) Температура охлаждающего воздуха должна быть не выше 40 °С при разомкнутой системе вентиляции и 35 °С при замкнутой системе вентиляции; температура воды, поступающей для непосредственного охлаждения — не выше 35 °С; температура воды, поступающей в теплообменники и воздухоохладители, — не выше 28 °С.

б) Допускается длительная несимметричная нагрузка, если токи в фазах не превышают номинального значения, а разность токов в фазах не превышает при косвенном воздушном охлаждении обмотки статора 20 % при $S_{ном} \leq 125\,000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, 15 % при $S_{ном} > 125\,000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; при непосредственном охлаждении обмотки статора водой 10 %.

в) Номинальный коэффициент мощности гидрогенераторов должен быть не менее:

0,8 при мощности 125 000 кВ·А и ниже;

0,85 при мощности от 125 000 до 360 000 кВ·А включительно;

0,9 при мощности свыше 360 000 кВ·А.

г) Статическая перегружаемость гидрогенератора должна быть не ниже 1,7.

д) Для изоляции обмоток статора и ротора должны применяться изолирующие материалы с нагревостойкостью не ниже класса В.

е) Температуры отдельных частей не должны превосходить для изоляции класса В: обмотки статора и активной стали сердечника статора — 105 °С для микалентной компаундированной изоляции, 120 °С для термореактивной изоляции; обмотки ротора — 130 °С; для изоляции класса F: обмотки статора и активной стали сердечника статора — 140 °С, обмотки ротора — 145 °С.

ж) Возбуждение генераторов должно производиться от возбудителя постоянного или переменного (через выпрямитель) тока, соединенного непосредственно с валом генератора (прямая система возбуждения), или от системы самовозбуждения.

з) Кратность предельного установившегося напряжения возбудителя (потолок) должна быть не менее 1,8 для электромашинных возбудителей постоянного тока и не менее 2,0 для других систем возбуждения.

и) Система возбуждения и ротор должны допускать двукратный (по отношению к номинальному) ток возбуждения в течение не менее 50 с для генераторов с косвенным охлаждением и не менее 20 с для генераторов с непосредственным или форсированным охлаждением обмотки ротора.

к) Номинальная скорость нарастания напряжения возбуждения при форсировке возбуждения должна быть для электромашинных систем возбуждения не менее 1,3-кратного номинального напряжения возбудителя в 1 с для гидрогенераторов мощностью до 4000 кВ·А включительно, не менее 1,5-кратного в 1 с для гидрогенераторов мощностью более 4000 кВ·А,

не менее 2-кратного в 1 с для других систем возбуждения.

л) Гидрогенераторы должны иметь продольно-поперечную демферную обмотку.

3. Требования к турбогенераторам (по ГОСТ 533-76).

а) Основные параметры турбогенераторов должны соответствовать указанным в табл. 24.9.

б) Номинальные данные турбогенераторов относятся к работе при следующих условиях: температура охлаждающей воды, поступающей в теплообменник, 33 °С;

температура охлаждающего газа, выходящего из газоохладителя, 40 °С.

температура охлаждающей жидкости, поступающей для непосредственного охлаждения, 40 °С.

в) Избыточное давление водорода при водородном охлаждении не менее 0,05 МПа.

г) Статическая перегружаемость не должна быть ниже 1,7 при мощности до 300 000 кВт; 1,6 при мощности 500 000 кВт, 1,5 при мощности 800 000 кВт и более.

д) Турбогенераторы должны допускать длительную работу при несимметричной нагрузке, если токи в фазах не превышают номинального значения и разность токов в фазах не превышает 10 % номинального значения.

е) Предельные значения температур активных частей — см. п. 2, е.

Таблица 24.9. Номинальные данные турбогенераторов

$P_{ном}$, МВт	$n_{ном}$, об/мин	$U_{ном}$, л, кВ	$\cos \varphi_{ном}$	$\eta_{ном}$, %
2,5 4	3000	3,15; 6,3	0,8	97 97,3
6 12 32 63		6,3; 10,5		97,4 97,5 98,2 98,3
100		10,5		98,4
160 200 300 500		18 15,75 20 20	0,85	98,5 98,6 98,7 98,7
800 1200		24 24		98,7 98,8
500	1500	20	0,85	98,6

Примечания: 1. Напряжение турбогенераторов мощностью 160 МВт и выше может быть изменено по договоренности между изготовителем и потребителем.

2. КПД турбогенераторов мощностью 32 МВт и более указан для водородного, водородно-жидкостного и жидкостного охлаждения.

3. Все турбогенераторы должны допускать работу в режиме номинальной активной мощности с $\cos \varphi = 1$.

Таблица 24.10. Номинальные данные синхронных компенсаторов

$S_{ном}$, МВ·А при опережающем токе	S_{max} , МВ·А при отстающем токе при работе без возбуждения, не менее	$U_{ном}$, кВ	$n_{ном}$, об/мин	Потери, Мвт, не более
10	5,5	6,3; 10,5	750; 1000	0,25
16	9		1000	0,37
25	16	10,5	750; 1000	0,525
32	17			0,5
50	20	11	750	0,8
100	50			1,35
160	80	15,75	750	1,75

ж) Корпус турбогенераторов с водородным охлаждением должен выдерживать в течение 15 мин гидравлическое давление 0,8 МПа.

з) Турбогенераторы с воздушным охлаждением должны иметь систему пожаротушения распыленной водой.

4. Требования к синхронным компенсаторам (по ГОСТ 609-75).

а) Основные параметры синхронных компенсаторов должны соответствовать указанным в табл. 24.10.

б) Компенсаторы мощностью до 25 000 кВ·А включительно для установки в закрытом помещении или для наружной установки выполняются с воздушным охлаждением.

Компенсаторы мощностью 32 000 кВ·А и выше с водородным охлаждением при избыточном давлении не ниже 0,1 МПа предназначаются для наружной установки на открытом воздухе.

в) Номинальные данные синхронных компенсаторов относятся к работе при следующих условиях:

высота над уровнем моря не более 1000 м; температура воды, поступающей в газоохладители, должна быть не выше 30 °С;

температура входящего охлаждающего газа не должна превышать 40 °С.

г) Компенсаторы с водородным охлаждением должны допускать продолжительную работу при уменьшенном до 0,05 МПа избыточном давлении, а также при воздушном охлаждении. Допустимая при этом нагрузка устанавливается в стандартах или технических условиях на конкретные типы компенсаторов.

д) Компенсаторы должны допускать длительную работу при несимметричной нагрузке, если ток в фазах не превышает 20 % номинального тока фазы.

е) Асинхронный пуск компенсатора должен происходить при напряжении на выводах машины не более 0,6 номинального. Для ограничения напряжения при необходимости должен быть предусмотрен реактор.

ж) Компенсаторы с воздушным охлаждением должны возбуждаться от возбудителя постоянного тока, непосредственно соединенного

с валом компенсатора, или от полупроводниковой системы возбуждения. Компенсаторы с водородным охлаждением должны иметь полупроводниковую систему возбуждения (статическую или бесщеточную).

з) Оболочка корпуса и торцевые щиты компенсатора с водородным охлаждением должны выдерживать в течение 2 мин гидравлическое давление 0,8 МПа.

5. Требования к другим синхронным генераторам и двигателям приводятся в следующих стандартах (помимо стандартов, указанных в § 23.20):

ГОСТ 17525-81. Генераторы электрические гидротурбинные (гидрогенераторы) капсульные. Общие технические условия.

ГОСТ 18200-79. Двигатели трехфазные синхронные мощностью 110 кВт и выше для привода вентиляторов и дымососов. Общие технические условия.

ГОСТ 14965-80. Генераторы трехфазные синхронные мощностью свыше 100 кВт. Общие технические условия.

ГОСТ 22407-77. Генераторы синхронные мощностью до 100 кВт. Общие технические требования и правила приемки.

ГОСТ 21558-76. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия.

ГОСТ 25457-82. Турбогенераторы. Устройства контроля и защиты. Общие технические требования.

24.17. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ С КОСВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

При косвенном охлаждении отвод тепла от активных частей электрической машины осуществляется через поверхность корпуса или сердечников, а также через поверхности лобовых частей обмоток. В качестве охлаждающего агента, как правило, используется газ (воздух или водород), циркулирующий в машине.

С косвенным воздушным охлаждением выпускаются синхронные машины общего назначения — двигатели и генераторы, синхронные компенсаторы серии КС, турбогенераторы серии Т и гидрогенераторы (кроме машин предельной мощности).

Водород обладает более благоприятными свойствами, чем воздух (см. табл. 24.12). Особенно преимущества водородного охлаждения проявляются в быстроходных машинах — турбогенераторах и синхронных компенсаторах.

Смесь водорода с воздухом оказывается взрывчатой при содержании водорода в смеси от 7 до 70 %. Следовательно, первым требованием, обеспечивающим безопасность работы с водородом, является поддержание достаточной чистоты водорода в корпусе машины, по крайней мере выше 70 %. Практически в корпусе удается иметь чистоту водорода около 97 %. Внутри корпуса поддерживается давление водорода, несколько превышающее атмосферное. Минимальное избыточное давление должно составлять 0,0035—0,005 МПа. При этом исключается проникновение воздуха внутрь корпуса через неизбежные неплотности и через масляные уплотнения выведенных на-

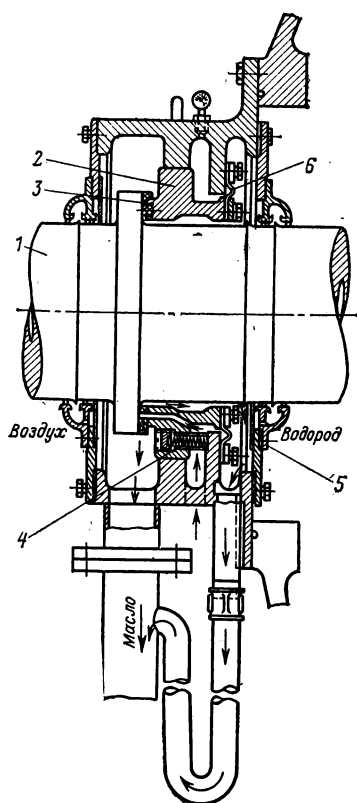


Рис. 24.27. Устройство однокамерного водородного уплотнения торцевого типа:

1 — вал ротора; 2 — вкладыш уплотнения; 3 — баббит; 4 — нажимные пружины; 5 — лабиринтное уплотнение; 6 — уплотнительная шайба

ружу концов вала, принцип устройства которых показан на рис. 24.27.

Плотность газовой смеси при избыточном давлении 0,005 МПа примерно в 8 раз меньше, чем у воздуха. Коэффициент теплопередачи от охлаждаемой поверхности к водороду получается в 1,35 раза, а теплопроводность примерно в 5 раз больше, чем у воздуха. Эти свойства обуславливают следующие преимущества косвенного водородного охлаждения при избыточном давлении водорода 0,005 МПа.

1. Вентиляционные потери и потери на трение ротора об охлаждающий газ пропорциональны плотности газа. При водородном охлаждении они снижаются примерно в 8 раз. В турбогенераторах мощностью 25—100 МВт, где эти потери при воздушном охлаждении составляют 25—50 % всех потерь, переход на водородное охлаждение приводит к повышению КПД примерно на 0,9—1,0 %.

2. Вследствие значительно большей теплопроводности водорода практически исчезают температурные перепады, связанные с наличием газовых прослоек в изоляции, а также между изоляцией и стенкой паза. Коэффициент теплопроводности изоляции возрастает примерно в 1,3 раза.

При сохранении превышений температур обмоток статора и ротора и основных размеров машины это позволяет увеличить мощность в

1,2 раза для турбогенераторов и в 1,3 раза для синхронных компенсаторов.

3. Изоляция машин с водородным охлаждением получается более надежной и долговечной благодаря отсутствию окисления, грязи и сырости, а также вследствие того, что коронирование в водороде менее вредно для изоляции, чем коронирование в воздухе.

4. Отсутствует опасность пожара обмотки, так как водород не поддерживает горения.

5. Поверхность газоохладителей при водородном охлаждении требуется меньшая, чем при воздушном.

Для предотвращения образования гремучей смеси воздуха и водорода в процессе заполнения корпуса водородом и при переходе с водородного охлаждения на воздушное применяется промежуточное заполнение машины другим газом, обычно углекислотой.

Механическая прочность машины с водородным охлаждением рассчитывается исходя из того, чтобы давление взрыва, если он произойдет, не повредило машину. Это давление в реальной машине не поднимается выше 0,35 МПа. С некоторым запасом корпус и торцевые щиты машины рассчитываются на давление 0,8 МПа.

На рис. 24.28 и 24.29 показан турбогенератор с косвенным водородным охлаждением серии ТВС, а на рис. 24.30—синхронный компенсатор серии КСВ.

24.18. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Электрической машиной с непосредственным (внутренним) охлаждением называется такая электрическая машина, в которой охлаждающий агент (жидкость или газ) циркулирует внутри проводников обмоток или по каналам, непосредственно соприкасающимся с проводниками.

Турбогенераторы

При обычном косвенном водородном охлаждении и предельных размерах ротора (диаметр 1,1—1,25 м, длина активной части 6,5 м), которые определяются допустимыми механическими напряжениями в материале ротора и необходимостью получения приемлемых значений критических частот вращения, мощность турбогенератора не превышает 150—160 МВт при избыточном давлении водорода 0,0035 МПа.

Увеличение давления водорода при косвенном охлаждении не позволяет снизить перепад температур в изоляции паза и стали, который составляет около 60 % общего перепада при избыточном давлении 0,0035 МПа. Поэтому увеличение избыточного давления примерно до 0,2 МПа дает возможность повысить предельную мощность турбогенератора с косвенным охлаждением только до 200 МВт.

Дальнейшее снижение перепада температуры от обмотки к охлаждающей среде при постоянной мощности или повышение мощности при сохранении прежнего превышения температуры оказывается возможным только при применении непосредственного охлаждения.

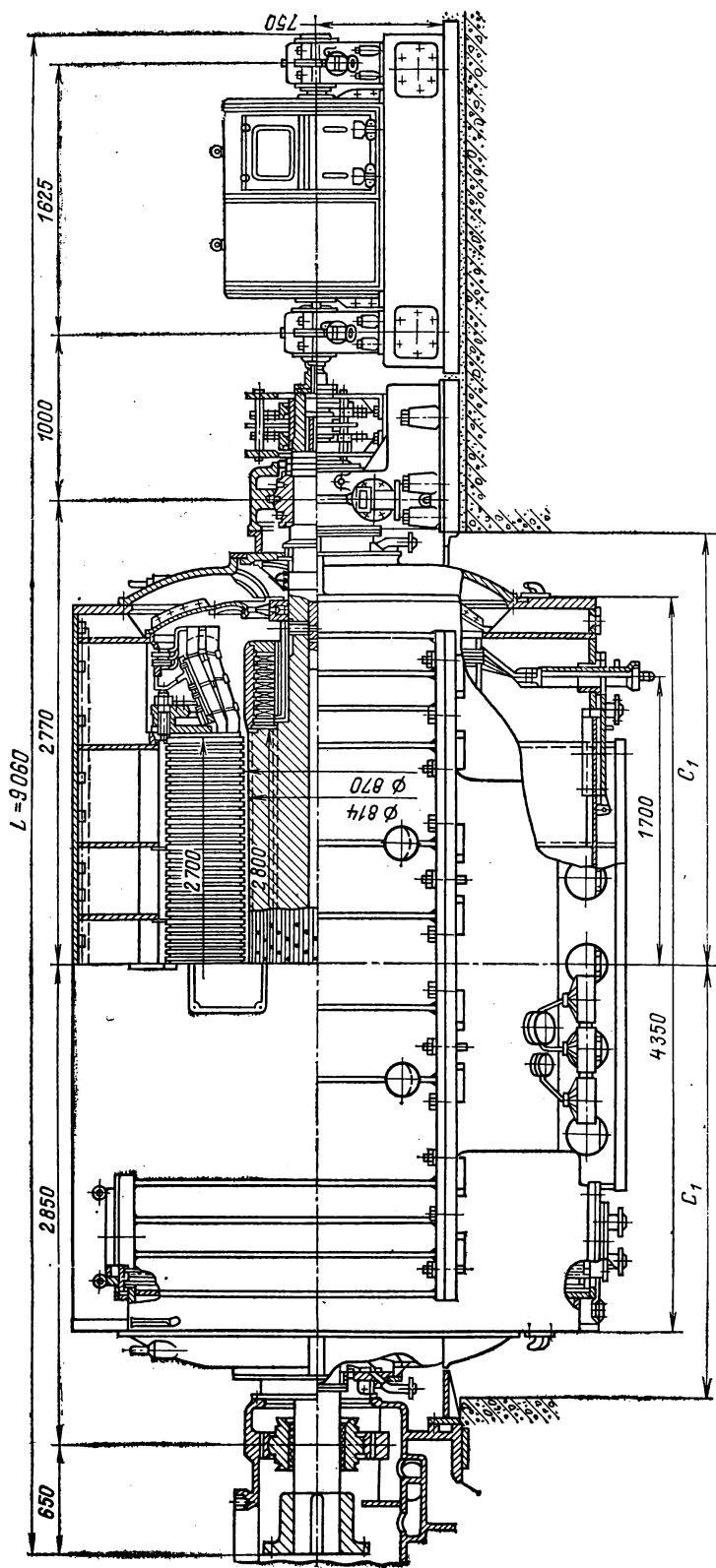


Рис. 24.28. Турбогенератор серии ТБС с косвенным водородным охлаждением (продольный разрез)

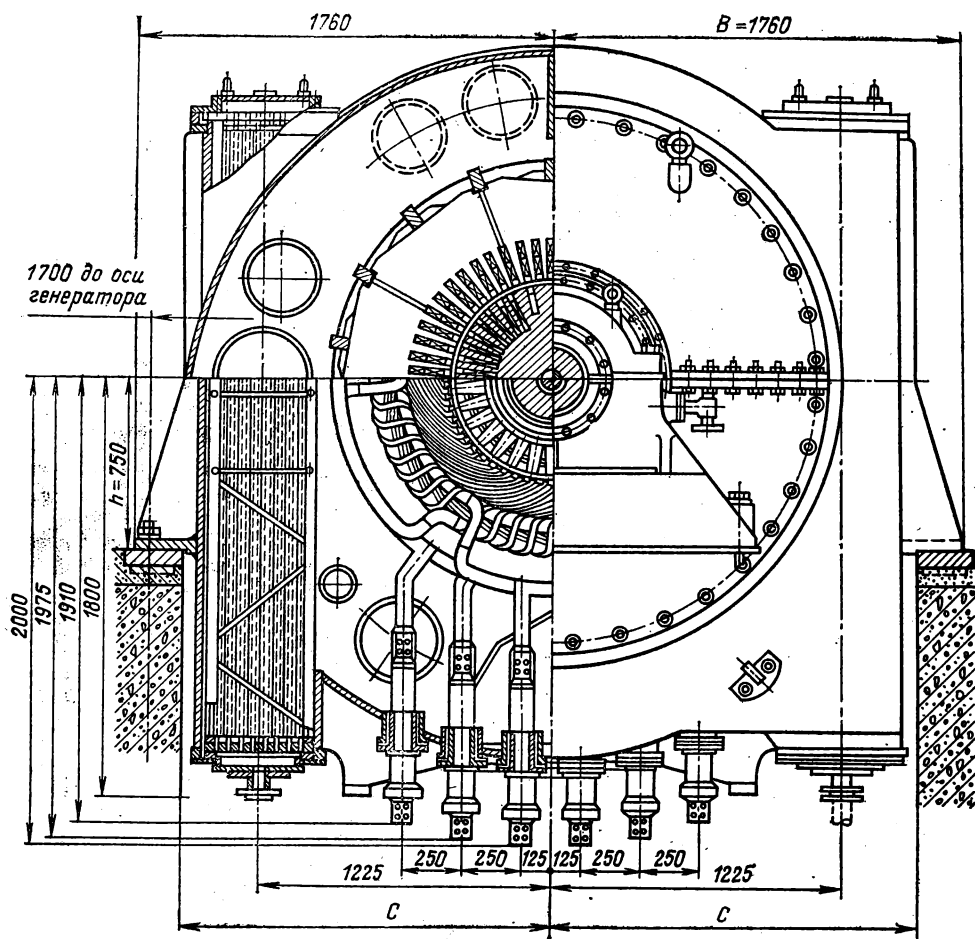


Рис. 24.29. Турбогенератор серии ТВС с косвенным водородным охлаждением (поперечный разрез)

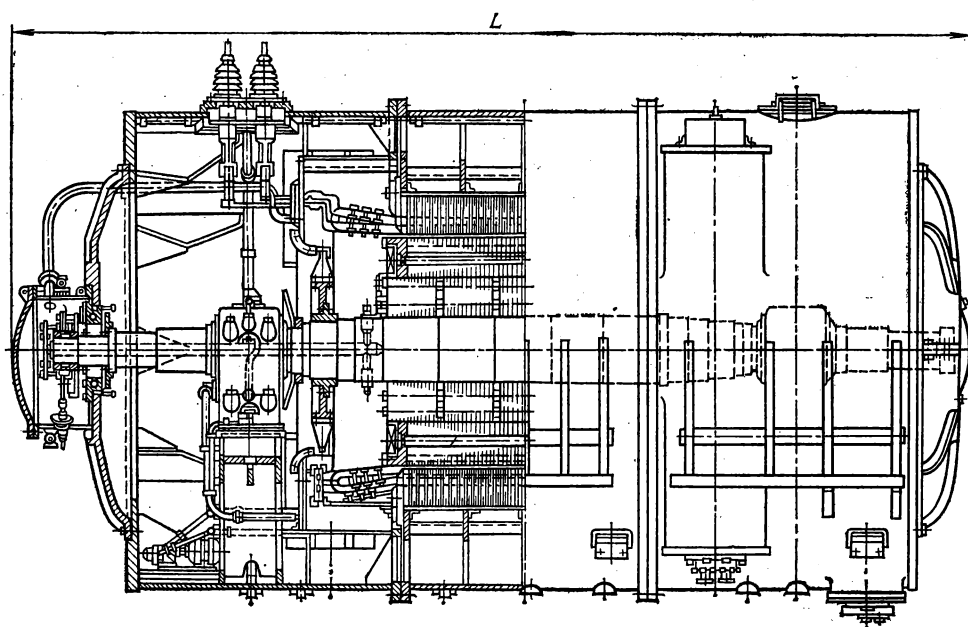


Рис. 24.30. Синхронный компенсатор с водородным охлаждением

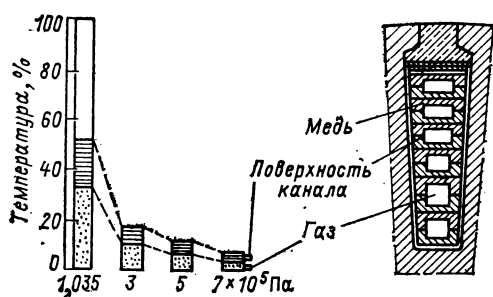


Рис. 24.31. Влияние повышения давления водорода на превышение температуры обмотки ротора при непосредственном охлаждении и потерях, которые дают превышение температуры 100 % при косвенном охлаждении

Как видно из рис. 24.31, даже при давлении 0,1035 МПа (избыточном давлении 0,0035 МПа) превышение температуры обмотки благодаря исключительно перепада температуры в изоляции составляет (в рассматриваемой конструкции) около 52 % перепада при косвенном охлаждении. При давлении 0,3 МПа этот перепад составляет около 18 % перепада при косвенном охлаждении.

Если сохранить прежнее превышение температуры, то мощность может быть увеличена в $\sqrt{100/18} \approx 2,4$ раза, т. е. доведена примерно до 350—500 МВт. Допустимая по нагреву мощность турбогенератора увеличивается при увеличении давления водорода значительно более резко, чем при косвенном охлаждении (табл. 24.11).

Еще большей, чем у водорода, способностью к теплоудалению обладают жидкости (вода, трансформаторное масло). Как видно из табл. 24.12, при одинаковых перепадах температуры и при практически приемлемых скоростях движения охлаждающих сред в каналах масло способно унести в 16,5/3=5,5 раза, а вода в 125/3≈41,7 раза больше тепла, чем водород при избыточном давлении 0,3 МПа. Жидкостное охлаждение обмотки статора позволяет уменьшить сечение каналов для охлаждающей среды, повысить плотность тока в обмотке, если это оправдывается экономическими соображениями, или существенно (в 2—3 раза) снизить перегрев обмотки статора, если плотность тока будет сохранена на прежнем уровне. Снижение температуры обмотки приводит в последнем случае к заметному уменьшению удельного электрического сопротивления и основных потерь в обмотке.

Однако применение жидкостного охлаждения только для обмотки статора не дает воз-

Таблица 24.11. Зависимость полной мощности турбогенератора с непосредственным водородным охлаждением обмоток статора и ротора от давления водорода

Избыточное давление водорода, МПа	0,0035	0,07	0,140	0,21	0,28	0,42
Полная мощность, % мощности при избыточном давлении 0,21 МПа	40	62	83	100	112	123

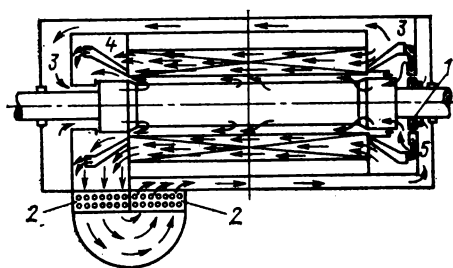


Рис. 24.32. Аксиальная система охлаждения обмотки статора, обмотки ротора и сердечника статора турбогенератора водородом повышенного давления:

1 — центробежный компрессор; 2 — водяные газоохладители; 3 — отсек высокого давления; 4 — отсек нагретого газа; 5 — отсек охлажденного газа

можности повысить мощность машины, поскольку она ограничивается нагревом ротора. Дальнейшее повышение мощности до 1000 МВт и более оказывается возможным при охлаждении и обмотки статора, и обмотки ротора дистиллированной водой.

В настоящее время в СССР намечались следующие четыре системы непосредственного охлаждения обмоток турбогенераторов:

1) аксиальная система охлаждения обмотки статора, обмотки ротора и сердечника статора водородом повышенного давления (рис. 24.32);

2) многоструйная радиальная система охлаждения турбогенератора водородом повышенного давления, в которой обмотка ротора имеет непосредственное охлаждение, а обмотка статора — косвенное охлаждение;

Таблица 24.12. Эффективность непосредственного охлаждения различными веществами по сравнению с воздухом

Вещество	Воздух при 0,1 МПа	Водород		Трансформаторное масло	Вода
		при 0,103 МПа	при 0,3 МПа		
Удельная весовая теплоемкость	1	14,35	14,35	1,65	3,75
Плотность	1	0,07	0,21	848	1000
Удельная объемная теплоемкость	1	1,0	3,02	1400	3750
Примерная способность к теплоудалению	1	1,0	3,02	16,5	125
Коэффициент теплопередачи от поверхности канала к охлаждающей среде ²	1	1,5	3,6	2,0	60,0

1. Под примерной способностью к теплоудалению понимается количество тепла, которое можно удалить от обмотки при допустимом превышении температуры и практически приемлемом давлении на входе в канал.

2. Коэффициенты теплопередачи для всех веществ, кроме масла, даны для турбулентного движения в длинном узком канале (даны практически достижимые значения). Для масла дан коэффициент при ламинарном движении, поскольку турбулентное движение масла в узком канале получить затруднительно.

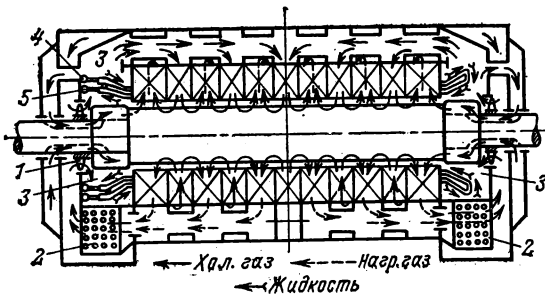


Рис. 24.33. Многоструйная радиальная система охлаждения сердечника статора и обмотки ротора турбогенератора водородом, совмещенная с жидкостным охлаждением обмотки статора:

1 — аксиальный вентилятор; 2 — водяной газоохладитель; 3 — отсеки высокого давления; 4 — коллектор холодной жидкости; 5 — коллектор нагретой жидкости

3) многоструйная радиальная система охлаждения сердечника статора и обмотки ротора водородом, совмещенная с жидкостным охлаждением обмотки статора водой (рис. 24.33);

4) система охлаждения обмоток статора и ротора жидкостью (маслом или водой), сочетаемая с воздушным (при пониженном давлении) или водородным охлаждением сердечников статора и ротора. В некоторых случаях сердечник статора охлаждается тоже жидкостью.

В первой системе (см. рис. 24.32), осуществленной, например, в турбогенераторах ТГВ-200 и ТГВ-300, циркуляция водорода внутри генератора осуществляется центробежным компрессором 1, установленным на валу ротора. Из отсека высокого давления 3 водород распределяется следующим образом:

а) часть водорода попадает в отверстия вентиляционных трубок, заложенных в стержни статора (рис. 24.34), охлаждает их и выходит в отсек нагретого газа 4;

б) часть водорода попадает в аксиальные каналы в сердечнике статора, охлаждает его и выходит в отсек 4;

в) часть водорода попадает под бандажные кольца ротора с обеих сторон машины,

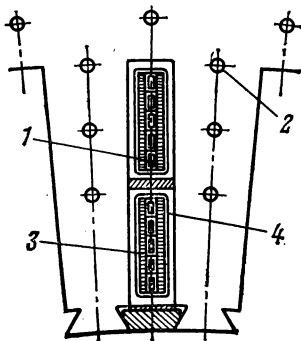


Рис. 24.34. Разрез паза статора турбогенератора с непосредственным охлаждением:

1 — трубки для водорода; 2 — осевые каналы для охлаждения активной стали; 3 — медные проводники; 4 — пазовая изоляция

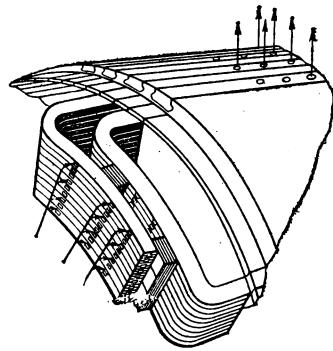


Рис. 24.35. Конструкция лобовых частей обмотки ротора в турбогенераторах с непосредственным водородным охлаждением

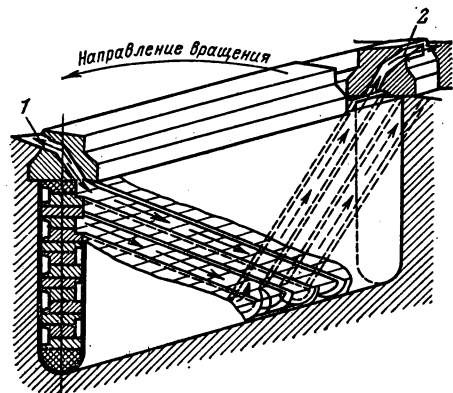


Рис. 24.36. Схема непосредственного водородного охлаждения обмотки ротора турбогенератора с забором газа из зазора:

1 — вход газа в обмотку; 2 — выход газа из обмотки

входит внутрь проводников ротора (рис. 24.35), охлаждает их и выбрасывается через радиальные отверстия в зазор, откуда выходит в отсек 4. Из отсека 4 водород, пройдя охладитель, подается по специальным каналам в отсек 5 на вход в компрессор.

Во второй и третьей системах (см. рис. 24.33) циркуляция водорода внутри машины осуществляется почти так же, как и в машинах с косвенным охлаждением. Отличие состоит в том, что водород, поступивший в зазор через радиальные каналы статора, не охлаждает ротор только снаружи, а захватывается специальными заборниками внутрь ротора (рис. 24.36). Далее, проходя по многочисленным наклонным каналам на поверхности катушки ротора, он охлаждает катушку с обеих сторон и выбрасывается в зазор.

Зона впуска газа в ротор совпадает с зоной выхода газа из радиальных вентиляционных каналов статора, зона выпуска газа в зазор — с зоной входа газа в каналы статора.

Различие между второй и третьей системами состоит лишь в том, что во второй системе, представленной в СССР турбогенераторами серии ТВФ, обмотка статора имеет косвенное водородное охлаждение, а в третьей системе, примененной в турбогенераторах серии ТВВ (рис. 24.37), обмотка статора охла-

Рис. 24.37. Турбогенератор ТВВ-320-2 с непосредственным охлаждением обмоток статора водой и обмотки ротора водородом при избыточном давлении 0,4 МПа

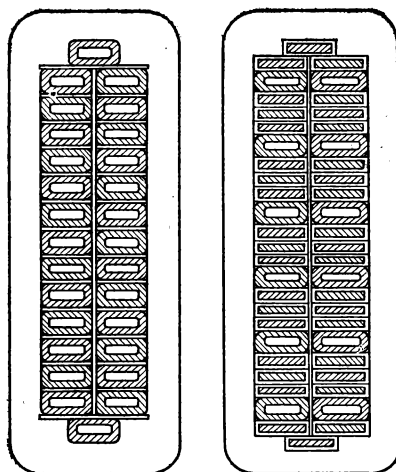
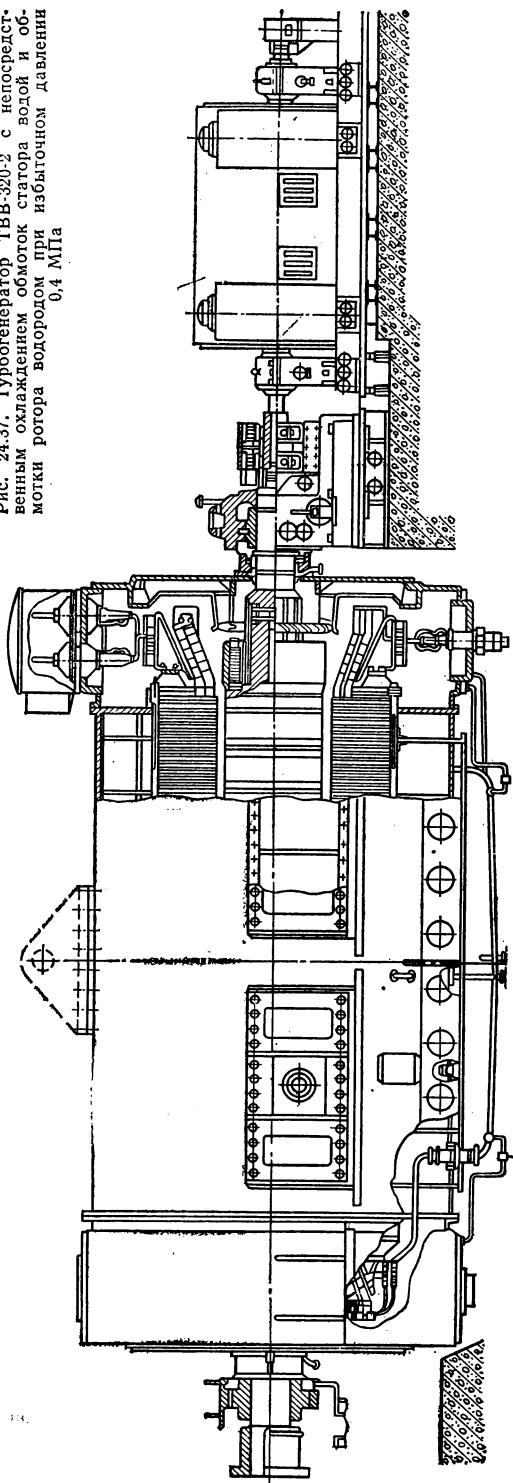


Рис. 24.38. Разрезы стержней различной конструкции статора турбогенератора с непосредственным жидкостным охлаждением

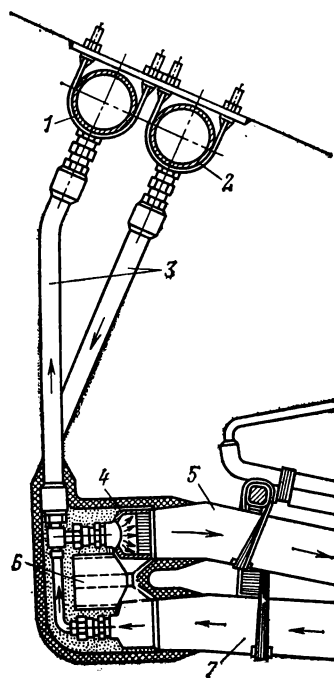


Рис. 24.39. Устройство ввода и вывода воды обмотки статора:

1 — сборный коллектор нагретой воды; 2 — сборный коллектор охлажденной воды; 3 — изолирующие гибкие шланги; 4 — медный водораспределительный наконечник стержня; 5 — стержень, подводящий воду к обмотке; 6 — электрическое соединение между наконечниками стержней; 7 — стержень, отводящий воду от обмотки

дается водой, протекающей по полым проводникам обмотки статора (рис. 24.38), которые сообщаются с коллекторами холодной и нагретой жидкости патрубками из изоляционного материала (см. рис. 24.33). Из коллектора 5 жидкость, пройдя через охладитель, снова по-

ступает в коллектор 4. На рис. 24.39 конструкция ввода и вывода воды показана более детально.

Четвертая система охлаждения применена в турбогенераторе ТВВ-500, в котором охлаждение обмоток статора и ротора водой соче-

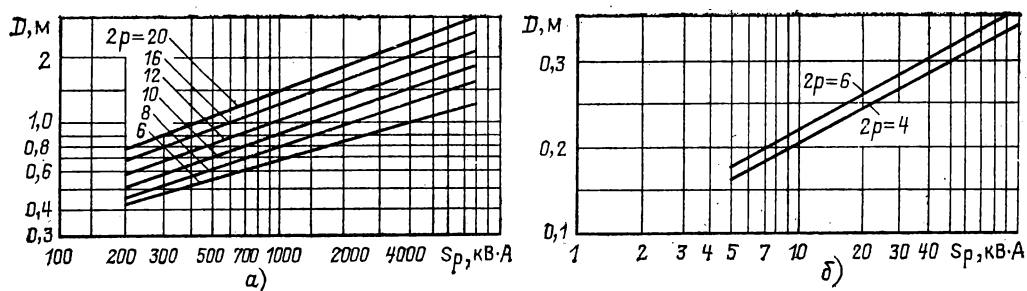


Рис. 24.42. Зависимость $D=f(S_p)$ для синхронных машин при различных числах полюсов: а — при $S_p > 100$ кВ·А; б — при $S_p \leq 100$ кВ·А

При помощи поперечных каналов поверхность охлаждения обмотки ротора можно увеличить в 8—12 раз.

24.19. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ СИНХРОННЫХ МАШИН

В задании на проектирование указывается ряд исходных величин, которые являются номинальными данными проектируемой электрической машины. Для синхронных машин эти данные следующие:

- номинальная мощность (полная мощность $S_{ном}$ для компенсатора; полная мощность $S_{ном}$ или ее активная составляющая $P_{ном}$ для генератора; мощность на валу $P_{ном}$ для двигателя);
- номинальная (синхронная) частота вращения $n_{ном}$ или $\Omega_{ном}$;
- $\cos \varphi_{ном}$ (обычно при перевозбуждении);
- номинальное (линейное) напряжение $U_{ном,л}$;
- частота f , Гц;
- число фаз ($m=3$) и соединение фаз (обычно λ).

Кроме того, могут дополнительно указываться требования к параметрам, моменту инерции, угонной частоте вращения, системам возбуждения и охлаждения.

Выбор главных размеров существенно зависит от принятой конструкции, способа охлаждения, частоты вращения. Обычно на первом этапе проектирования при определении

главных размеров ориентируются на машины, уже освоенные промышленностью. Ниже приводятся основные данные для выбора главных размеров трехфазных синхронных машин, предназначенных для включения в сеть 50 Гц и длительного режима работы. Предполагается, что машины удовлетворяют требованиям, сформулированным в стандартах на эти машины (см. разд. 23 и § 24.16).

1. Синхронные явнополюсные генераторы и двигатели общего назначения. Предполагается, что машины имеют косвенное воздушное охлаждение, защищенное или закрытое исполнение и внутреннюю самовентиляцию.

- Расчетная мощность (см. § 23.21)

$$S_p = k_E S_{ном},$$

где $k_E \approx 1,06$; $S_{ном} = P_{ном} / (\eta \cos \varphi_{ном})$ — для двигателей; $k_E \approx 1,08$; $S_{ном} = P_{ном} / \cos \varphi_{ном}$ — для генераторов.

Значения η предварительно могут быть выбраны по табл. 24.13.

б) По рис. 24.42 определяется (предварительно) в зависимости от S_p и $2p$ внутренний диаметр сердечника статора и рассчитывается полюсное деление $\tau = \pi D / (2p)$.

в) По рис. 24.43 или 24.44 определяются (предварительно) электромагнитные нагрузки A и $B_{ном}$.

- Машинная постоянная (см. § 23.21)

$$C_A = \frac{2}{\pi k_B \alpha_\delta k_{w1} B_{ном} A} \text{ в}$$

Таблица 24.13. Значение КПД, %, для синхронных двигателей при $\cos \varphi = 0,9$ и $U_{ном} = 6000$ В

$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин							
	1500	1000	750	600	500	375	300	250
315	—	94,2	93,9	93,4	—	91,25	91,27	90,8
400	—	94,6	94	93,9	92,9	91,6	91,94	92
500	—	94,7	94,4	94,3	93,7	92,65	93	93
630	95	95,1	94,9	94,6	94,28	93,4	93,34	93,5
800	95,5	95,6	94,95	95,17	94,42	94,2	93,9	93,9
1000	95,5	95,63	95,5	95,4	95	95	94,4	94,45
1250	—	95,9	95,8	95,54	95,45	95,3	94,66	94,66
1600	—	96,3	96	96	95,85	95,77	95,2	95,0
2000	—	96,8	96,3	96,3	96,2	95,78	95,7	95,4
2500	—	96,8	96,7	96,6	96,5	96,23	95,72	95,65
3200	—	97	96,8	96,88	96,6	96,69	96,1	96
4000	—	97,2	97	96,83	96,76	96,54	96,3	96,28
5000	—	97,3	97,2	97,09	97,07	—	—	—

Примечание. При $U_{ном} = 380$ В КПД двигателей увеличивается на 0,3—1 %, а при $U_{ном} = 10\,000$ В — снижается на 0,05—0,2 %.

где предварительно можно принять $\alpha_\delta = 0,65 \div 0,68$; $k_B = 1,16 \div 1,14$; $k_{w1} \approx 0,92$ (соответствует $y \approx 0,83 \tau$).

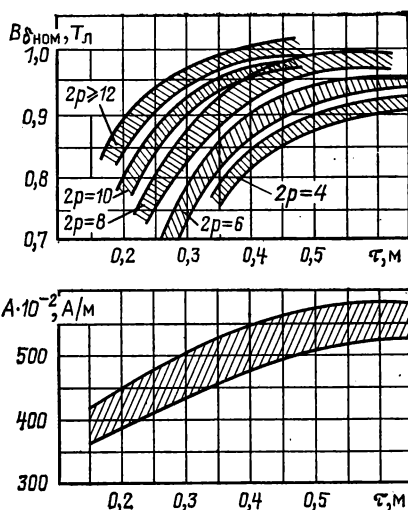


Рис. 24.43. Зависимость $B_{\delta\text{ном}}$ и A от τ для синхронных машин мощностью $P_{\text{ном}} > 100$ кВт

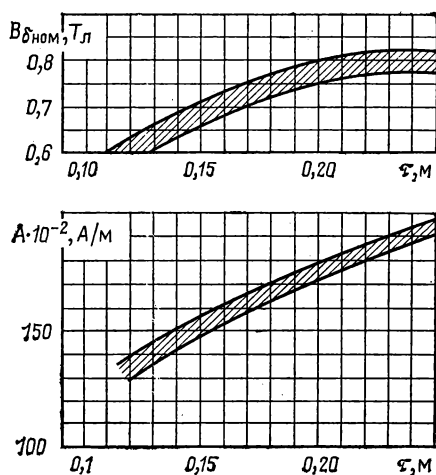


Рис. 24.44. Зависимость $B_{\delta\text{ном}}$ и A от τ для синхронных машин мощностью $P_{\text{ном}} \leq 100$ кВт

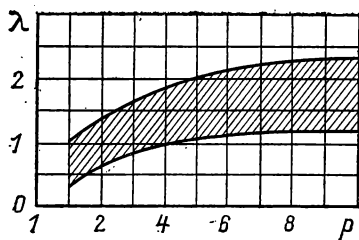


Рис. 24.45. Зависимость $\lambda = I_\delta/\tau$ от числа пар полюсов

д) Расчетная длина сердечника статора

$$l_\delta = \frac{2S_p}{\pi k_B \alpha_\delta k_{w1} B_{\delta\text{ном}} A D^2 \Omega_{\text{ном}}}.$$

При правильном выборе главных размеров отношение $\lambda = I_\delta/\tau$ для синхронных машин общего назначения должно находиться в пределах, указанных на рис. 24.45.

Примечание. Если в задании был указан момент инерции, то после выбора D и l_δ необходимо рассчитать его и сравнить с требуемым значением. В случае необходимости главные размеры корректируются за счет изменения в допустимых пределах λ (рис. 24.45) и, если потребуется, A и $B_{\delta\text{ном}}$.

Материалы по проектированию синхронных машин общего назначения можно найти в [24.21]

2. Гидрогенераторы. При выборе главных размеров гидрогенератора необходимо учитывать, что по условиям динамической устойчивости и повышения частоты вращения при сбросе нагрузки должен быть обеспечен требуемый момент инерции вращающихся частей гидрогенератора. Если необходимый момент инерции в задании на проект не указан, его можно определить (ориентировочно) по рекомендуемым значениям постоянной инерции T_J :

$$J = T_J S_{\text{ном}} / \Omega_{\text{ном}}^2,$$

где $T_J = 2 \div 3$ с при $S_{\text{ном}} = 100 \div 1000$ кВт·А; $T_J = 3 \div 5$ с при $S_{\text{ном}} = 1000 \div 10\,000$ кВт·А; $T_J = 5 \div 8$ с при $S_{\text{ном}} > 10\,000$ кВт·А.

В гидрогенераторах приближенно можно считать, что $J \approx J_p$, где J_p — момент инерции ротора, который определяется через главные размеры:

$$J_p \approx 825 D^4 l_\delta \varphi_J.$$

При $p \leq 12$ обод ротора насаживается на вал и $\varphi_J \approx 0,75$; при $p > 12$ обод насаживается на спицевой остов и

$$\varphi_J \approx 0,95 - 0,21 \sqrt{\frac{p}{k_2 \pi} - 2},$$

где

$$k_2 = \frac{h_p + h_m + h_{a2}}{\tau} \approx 1,75 \text{ (см. рис. 24.22).}$$

а) Расчетная мощность

$$S_p = k_E S_{\text{ном}},$$

где

$$k_E = \sqrt{1 + x_\sigma (2 \sin \varphi_{\text{ном}} + x_\sigma)};$$

$x_\sigma \approx 0,125$. При $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ $k_E = 1,08$.

б) Электромагнитные нагрузки A и $B_{\delta\text{ном}}$ и произведение коэффициентов $k_{w1} k_B \alpha_\delta$ для гидрогенераторов с косвенным воздушным охлаждением могут быть определены (предварительно) по табл. 24.14 в зависимости от мощности на одно полюсное деление $S_{\text{ном}}/(2p)$.

Примечания: 1. Для гидрогенераторов с водяным охлаждением обмотки статора и воздушным охлаждением обмотки ротора и сердечника статора

линейная нагрузка может быть увеличена в 1,8 раза, а индукция — в 1,1 раза по сравнению со значениями, указанными в табл. 24.14.

2. Для гидрогенераторов с полным водяным охлаждением (обмоток статора и ротора и сердечника статора) линейная нагрузка может быть увеличена в 2,0 раза, а индукция — в 1,2 раза по сравнению со значениями, указанными в табл. 24.14.

Таблица 24.14. Электромагнитные нагрузки гидрогенераторов с косвенным воздушным охлаждением

$S_{\text{НОМ}}/(2p)$, кВ·А	20	100	300	800	1600	>3200
$A \cdot 10^{-2}$, А/м	450	500	540	575	610	650— 670
$B_{\delta \text{ ном}}$, Тл	0,690	0,725	0,750	0,770	0,780	0,790— 0,800
$\alpha_{\delta} k_B k_{w1}$	0,711	0,729	0,729	0,744	0,744	0,758

Примечание. Значения указаны применительно к генераторам с термопластической изоляцией обмоток статора. Для машин с терморезистивной изоляцией линейная нагрузка может быть увеличена примерно в 1,2 раза.

в) Внутренний диаметр статора

$$D = 0,035 \sqrt{\frac{J_p \Omega_{\text{НОМ}}}{\Phi_J C_A S_p}},$$

где C_A — как в п. 1, г.

При выбранном диаметре окружная скорость на наружной поверхности ротора при повышенной частоте вращения не должна превышать предельных значений $v = \pi D 1,75 n_{\text{НОМ}} \leq v_{\text{max}}$, где $v_{\text{max}} = 120$ м/с при ободке, набранном из сегментов ($D > 5$ м, $p > 12$), $v_{\text{max}} = 145$ м/с при изготовлении сегментов обода из легированных сталей, $v_{\text{max}} = 170$ м/с при ковном или дисковом ободке ($p = 6 \div 12$).

Примечание. Если окажется, что $v > v_{\text{max}}$ то диаметр D должен быть уменьшен до $D = v_{\text{max}} / (1,75 \pi n)$. Необходимое значение J_p в этом случае может быть получено за счет искусственного утяжеления обода ротора.

г) Расчетная длина

$$l_{\delta} = \frac{C_A S_p}{\Omega_{\text{НОМ}} D^2}.$$

При правильно выбранных главных размерах отношение $\lambda = l_{\delta} / \tau$ должно быть равно 1,5—4,0.

Материалы по проектированию гидрогенераторов приводятся в [24.2, 24.9].

3. Синхронные компенсаторы. а) Расчетная мощность

$$S_p = k_E S_{\text{НОМ}}, \quad \text{где } k_E \approx 1,13.$$

б) Электромагнитные нагрузки A и $B_{\delta \text{ ном}}$ отношение $\lambda = l_{\delta} / \tau$ и произведение коэффициентов $\alpha_{\delta} k_B k_{w1}$ могут быть выбраны по табл. 24.15.

в) Внутренний диаметр сердечника статора

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 f S_p C_A}{\lambda \Omega_{\text{НОМ}}^2}}.$$

Таблица 24.15. Электромагнитные нагрузки синхронных компенсаторов

$S_{\text{НОМ}}$, МВ·А	10	16	25	32	50	100	160
$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	100				750		
Охлаждение	Воздушное				Водородное		
Избыточное давление, МПа	—				0,1	0,2	
$A \cdot 10^{-2}$, А/м	570	600	620	650	900	1000	1100
$B_{\delta \text{ ном}}$, Тл	0,8				0,82		
$\lambda = l_{\delta} / \tau$	1,3	1,4	1,5	1,6	1,3	2,5	3,6
$\alpha_{\delta} k_B k_{w1}$	0,77				0,78	0,80	

Примечание. Если при повышенной частоте вращения $v = \pi D n_{\text{НОМ}} k_y > v_{\text{max}}$ ($k_y = 1,2$; $v_{\text{max}} = 125$ м/с), то диаметр D должен быть уменьшен до $D = v_{\text{max}} / (k_y \pi n_{\text{НОМ}})$.

г) Расчетная длина

$$l_{\delta} = \lambda \tau = \lambda \pi D / 2p.$$

Материалы по проектированию компенсаторов можно найти в [24.2, 24.5].

4. Турбогенераторы. Внутренний диаметр статора D может быть ориентировочно выбран по рис. 24.46 в зависимости от расчетной мощности S_p и способа охлаждения. Электромагнитные нагрузки A и $B_{\delta \text{ ном}}$ определяются в зависимости от диаметра D и способа охлаждения по рис. 24.47 и 24.48.

Коэффициенты: $k_E = 1,08 \div 1,15$ (большие значения для генераторов большей мощности), $k_B \approx 1,11$, $\alpha_{\delta} \approx 0,64$, $k_w \approx 0,92$. Машинная постоянная C_A определяется по п. 1, г, расчетная длина l_{δ} — по п. 1, д. Материалы по проектированию турбогенераторов приводятся в [24.10, 24.24].

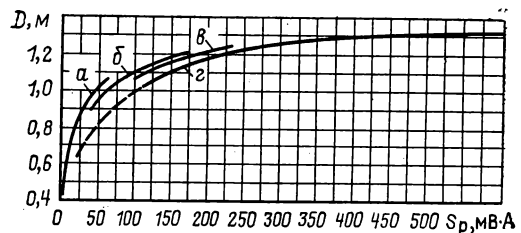


Рис. 24.46. Зависимость внутреннего диаметра статора турбогенератора от мощности и системы охлаждения:

а — косвенное воздушное; б — косвенное водородное; в — непосредственное водородное ротора; г — непосредственное водородное ротора и водяное статора

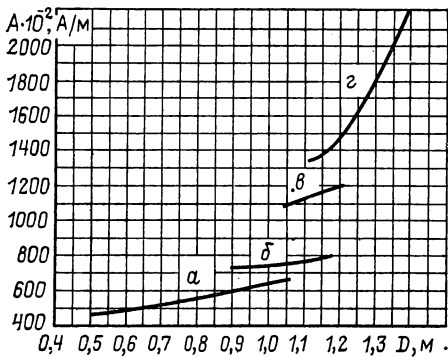


Рис. 24.47. Зависимость линейной нагрузки статора A от внутреннего диаметра статора D для турбогенераторов с различными системами охлаждения:

a — косвенное воздушное; b — косвенное водородное; c — непосредственное водородное ротора и водяное статора

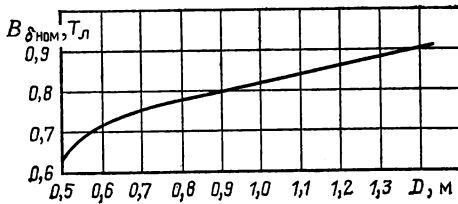


Рис. 24.48. Зависимость индукции в воздушном зазоре $B_{\delta\text{ном}}$ от внутреннего диаметра статора турбогенератора

24.20. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ЗАЗОРЕ. МАГНИТОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛЯ

Магнитное поле в зазоре синхронной машины создается МДС обмотки возбуждения и МДС обмотки якоря. Основную роль в процессе преобразования энергии в обычных машинах играет основная гармоническая индукция поля в зазоре. Поле этой гармонической называется полем взаимной индукции. Точный расчет этого поля с учетом насыщения магнитной цепи и конструктивного исполнения ротора является весьма сложной задачей.

При допущении о бесконечно большой проницаемости стальных участков поле взаимной индукции может быть представлено как сумма основных гармонических полей созданных МДС обмотки возбуждения (см. § 23.27)

$$F_f = \omega_f I_f$$

и основной гармонической МДС обмотки якоря (см. § 23.26)

$$F_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m_1 \frac{I \omega_1 k_{w1}}{p}$$

Поле, созданное каждой из обмоток, принято характеризовать с помощью коэффициентов поля, определяемых по специальным кривым, которые были получены из расчета каждого поля в отдельности численными методами или с помощью моделирования.

а) Поле обмотки возбуждения (см. рис. 23.36, 23.38) характеризуется коэффициентами k_f , k_Φ , α_δ и k_B .

Коэффициент формы поля возбуждения

$$k_f = B_{\delta f1} / B_{\delta f}$$

равен отношению основной гармонической индукции к амплитуде радиальной составляющей индукции на поверхности сердечника статора.

Коэффициент потока возбуждения

$$k_\Phi = \Phi_f / \Phi_{f1}$$

равен отношению полного потока взаимной индукции

$$\Phi_f = \alpha_\delta \tau l_\delta B_{\delta f}$$

к потоку взаимной индукции, определенному по первой гармонической индукции,

$$\Phi_{f1} = \frac{2}{\pi} \tau l_\delta B_{\delta f1}$$

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия

$$\alpha_\delta = \frac{B_{\delta\text{ср}}}{B_{\delta f}} \cdot \frac{2}{\pi} k_\Phi k_f$$

равен отношению средней индукции к амплитуде радиальной составляющей индукции на поверхности сердечника статора.

Коэффициент формы ЭДС

$$k_B = \frac{B_{\delta\text{д1}}}{B_{\delta\text{ср}}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2} k_\Phi}$$

равен отношению действующего значения основной гармонической индукции к средней индукции в зазоре.

В явнополюсной машине коэффициенты поля зависят от соотношения размеров активной зоны ($\alpha = b_p / \tau$; $\xi = \delta_{\text{max}} / \delta'$; $\beta = \delta' / \tau$). Влияние зубчатости сердечников и насыщения зубцов и ярма статора учитывается введением эквивалентного зазора на оси полюса $\delta' = \delta k_\delta k_{za}$, где k_δ — коэффициент, учитывающий влияние пазов статора и пазов демпферной обмотки; k_{za} — коэффициент насыщения сердечника статора (см. § 24.26). В первом приближении $k_{za} = 1$.

Коэффициент k_Φ определяется по рис. 24.49, коэффициент k_f — по рис. 24.50.

Коэффициенты α_δ и k_B рассчитываются через коэффициенты k_Φ и k_f по приведенным выше соотношениям.

Для неявнополюсной машины

$$k_f = \frac{8 \sin \frac{\gamma \pi}{2}}{\pi^2 \gamma}; \quad \alpha_\delta = 1 - 0,5 \gamma;$$

$$k_\Phi = \pi \alpha_\delta / 2 k_f; \quad k_B = \pi / 2 \sqrt{2} k_\Phi,$$

где $\gamma = Z_2 / Z'_2$ — коэффициент заполнения окружности ротора обмоткой возбуждения.

Влияние насыщения учитывается с помощью коэффициентов κ_B и $\kappa_\alpha = f(k_2)$, приведенных на рис. 24.51. С учетом насыщения

$$k_B = k_{B0} \kappa_B; \quad \alpha_\delta = \alpha_{\delta 0} \kappa_\alpha,$$

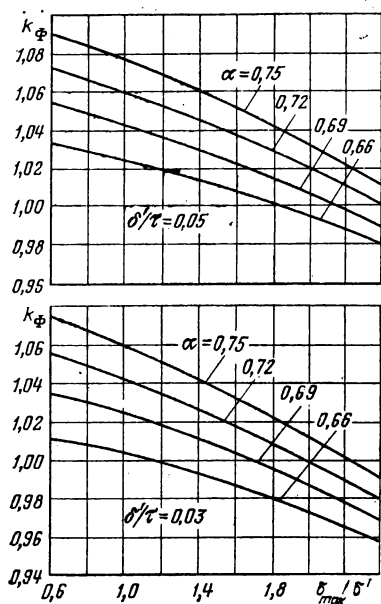


Рис. 24.49

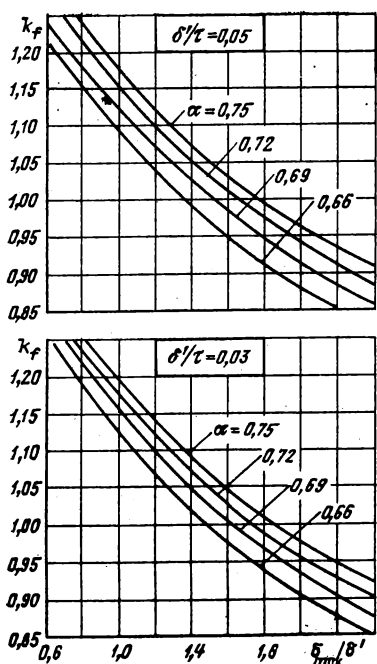


Рис. 24.50

где k_{B0} , $\alpha_{B0} = f(\gamma)$ — без учета насыщения. После определения k_B и α_B рассчитываются k_f и k_Φ .

6) Магнитное поле обмотки якоря в линейном приближении можно представить в виде суммы двух полей, созданных продольной составляющей МДС обмотки F_d , ось которой совпадает с осью полюса d , и поперечной со-

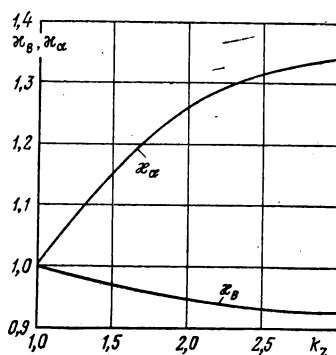


Рис. 24.51

ставляющей F_q , ось которой совпадает с осью межполюсного пространства q :

$$F_d = F_a |\sin \psi| = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m_1 \frac{I_d \omega_1 k_{w1}}{p};$$

$$F_q = F_a |\cos \psi| = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m_1 \frac{I_q \omega_1 k_{w1}}{p}.$$

В этих уравнениях $I_d = I |\sin \psi|$, $I_q = I |\cos \psi|$ — продольная и поперечная составляющие тока якоря; ψ — угол (электрический) между ЭДС возбуждения E_f и током якоря I . В зависимости от режима нагрузки продольная система токов I_d может быть намагничивающей (рис. 24.52, а) или размагничивающей (рис. 24.52, б).

Поле от продольной составляющей МДС якоря (рис. 24.53) характеризуется коэффициентом формы поля по продольной оси

$$k_d = B_{ad1}/B_{ad},$$

который равен отношению основной гармонической индукции от продольной МДС B_{ad1} к амплитуде индукции от этой МДС, определенной при равномерном эквивалентном зазоре $\delta' = \delta k_\delta$ с учетом пазов статора и полюсного наконечника ($B_{ad} = \mu_0 F_d / \delta'$).

Для явнополюсной машины

$$k_d = k_f k_{ad},$$

где $k_{ad} = k_d / k_f$ — коэффициент реакции по продольной оси (см. ниже) находится по рис. 24.54.

Поле от поперечной составляющей МДС якоря (рис. 24.55) характеризуется коэффициентом формы поля по поперечной оси

$$k_q = B_{aq1}/B_{aq},$$

который равен отношению основной гармонической индукции B_{aq1} от поперечной МДС якоря к амплитуде индукции B_{aq} от этой МДС, определенной при равномерном зазоре δ' ($B_{aq} = \mu_0 F_q / \delta'$).

Для явнополюсной машины

$$k_q = k_f k_{aq},$$

где $k_{aq} = k_q / k_f$ — коэффициент реакции по поперечной оси, находится по рис. 24.56.

Для неявнополюсной машины

$$k_d = k_q = 1.$$

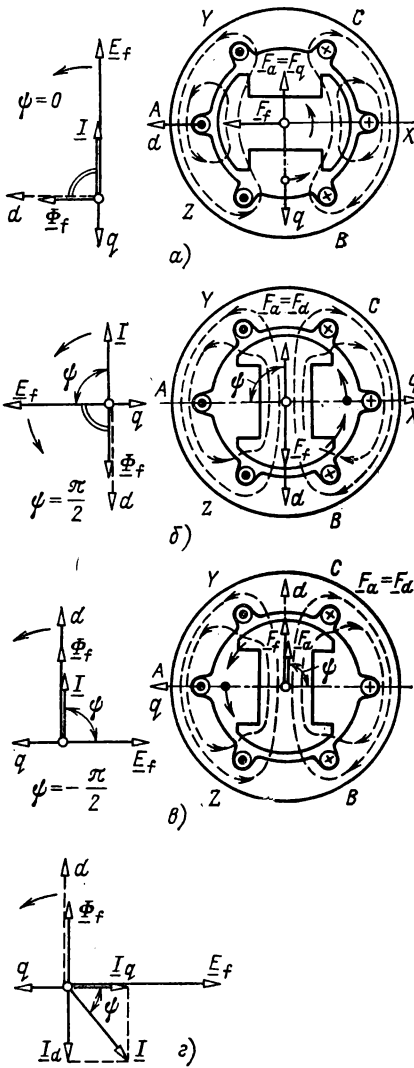


Рис. 24.52. Магнитные поля от МДС якоря при нагрузке (режим генератора):

а — поперечная МДС якоря; б — продольная размагничивающая МДС; в — продольная намагничивающая МДС; г — МДС якоря при произвольном токе

в) Эквивалентирование МДС обмотки якоря. Магнитодвижущая сила обмотки якоря F_a и ее продольная и поперечная составляющие F_d, F_q отличаются по форме от МДС обмотки возбуждения F_f . Магнитодвижущая сила якоря распределена по поверхности якоря синусоидально; распределение МДС возбуждения значительно отличается от синусоидального. Это обстоятельство затрудняет сложение МДС якоря и МДС возбуждения, которое необходимо производить при расчете режимов работы машины. Поэтому для упрощения расчетов синусоидальные МДС якоря заменяются эквивалентными МДС обмотки возбуждения, выбранными из условия сохранения основных гармонических индукции в зазоре и ЭДС, индуцированных в обмотке якоря.

Рис. 24.53

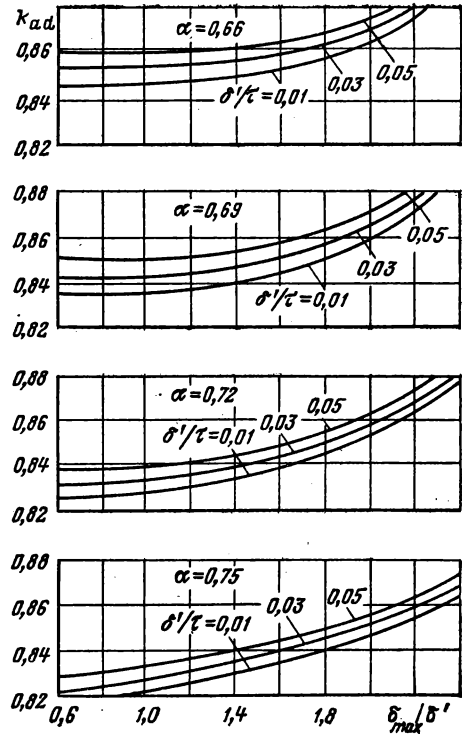
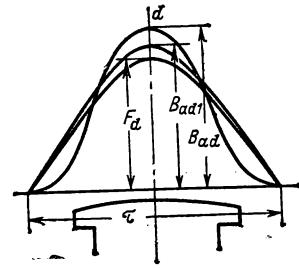
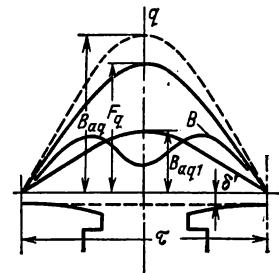


Рис. 24.54

Рис. 24.55



Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения, эквивалентная продольной МДС якоря,

$$F_{ad} = k_{ad} F_d,$$

где k_{ad} — см. выше;

МДС обмотки возбуждения, эквивалентная поперечной МДС якоря,

$$F_{aq} = k_{aq} F_q,$$

где k_{aq} — см. выше;

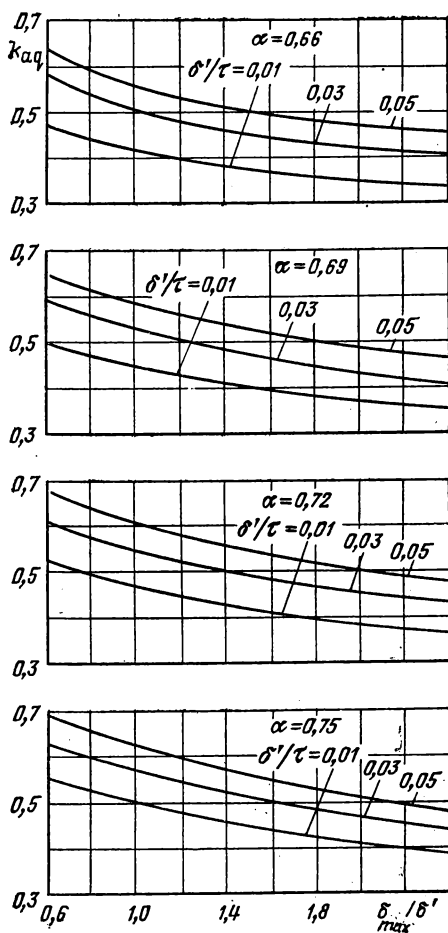


Рис. 24.56

МДС обмотки возбуждения, эквивалентная МДС якоря неявнополюсной машины,

$$F_{af} = k_a F_a = F_a / k_f,$$

где $k_a = k_a / k_f = 1 / k_f$ — см. выше.

24.21. ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКИ. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛЯ ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКИ

В рабочем режиме при вращении ротора с синхронной скоростью в демпферной обмотке индуцируются токи, обусловленные высшими гармоническими поля обмотки якоря и пульсациями поля возбуждения вследствие зубчатости статора.

В переходных процессах и при асинхронном вращении ротора по демпферной обмотке протекают также токи, наведенные основной гармонической поля, и, таким образом, демпферная обмотка участвует в создании основного магнитного поля. С целью упрощения математического описания переходных процессов многоконтурная демпферная обмотка на каждом полюсном делении заменяется двумя экви-

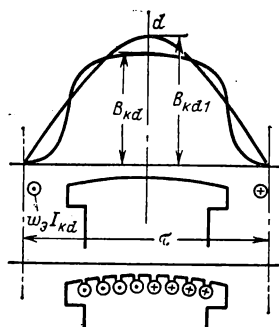


Рис. 24.57

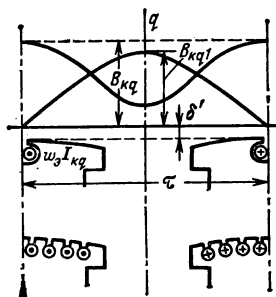


Рис. 24.58

валентными контурами: *продольным эквивалентным контуром* (рис. 24.57) и *поперечным эквивалентным контуром* (рис. 24.58).

Эти контуры размещаются на полюсном делении таким образом, что с продольным контуром взаимодействует только продольное поле машины, а с поперечным — только поперечное поле. Числа витков w_d эквивалентных контуров выбираются произвольным образом. Токи в них выражаются через индуцированные токи в демпферной обмотке. Ток продольного эквивалентного контура I_{kd} должен образовывать такую же основную гармоническую индукции магнитного поля в зазоре, как и система продольных токов в демпферной обмотке, индуцированная при изменении продольного поля. Ток поперечного эквивалентного контура I_{kq} должен образовывать такую же основную гармоническую индукции в зазоре, как и система поперечных токов в демпферной обмотке, индуцированная при изменении поперечного поля. Параметры эквивалентных контуров (см. § 24.24, 24.25) выражаются через параметры отдельных контуров демпферной обмотки, образованных двумя соседними стержнями и участками короткозамыкающих колец между этими стержнями.

Активные сопротивления эквивалентных контуров (r_{kd} или r_{kq}) рассчитываются исходя из того, чтобы в них выделялись такие же потери, как и потери в демпферной обмотке при продольной или поперечной системе токов. Индуктивные сопротивления рассеяния продольного или поперечного эквивалентного контура ($x_{k\sigma d}$ или $x_{k\sigma q}$) рассчитываются исходя из сохранения реактивной мощности, соответствующей полям рассеяния продольной или поперечной системы токов в демпферной обмотке.

Поле машины при переходных процессах определяется с учетом полей, образованных МДС продольного эквивалентного контура демпферной обмотки

$$F_{kd} = \omega_3 I_{kd}$$

и МДС поперечного эквивалентного контура демпферной обмотки

$$F_{kq} = \omega_3 I_{kq}.$$

Поле от МДС продольного эквивалентного контура демпферной обмотки (см. рис. 24.57) характеризуется коэффициентом формы поля демпферной обмотки по продольной оси

$$k_{kd} = B_{kd1}/B_{kd},$$

который равен коэффициенту формы поля обмотки возбуждения k_f (см. рис. 24.50).

Поле от МДС поперечного эквивалентного контура демпферной обмотки (рис. 24.58) характеризуется коэффициентом формы поля демпферной обмотки по поперечной оси

$$k_{kq} = B_{kq1}/B_{kq},$$

который равен отношению основной гармонической магнитной индукции от МДС поперечного эквивалентного контура к амплитуде индукции от этой МДС, определенной при равномерном зазоре δ' между сердечниками.

Для явнополюсной машины коэффициенты $k_{kd} = k_f$ и k_{kq} определяются по рис. 24.50, 24.59.

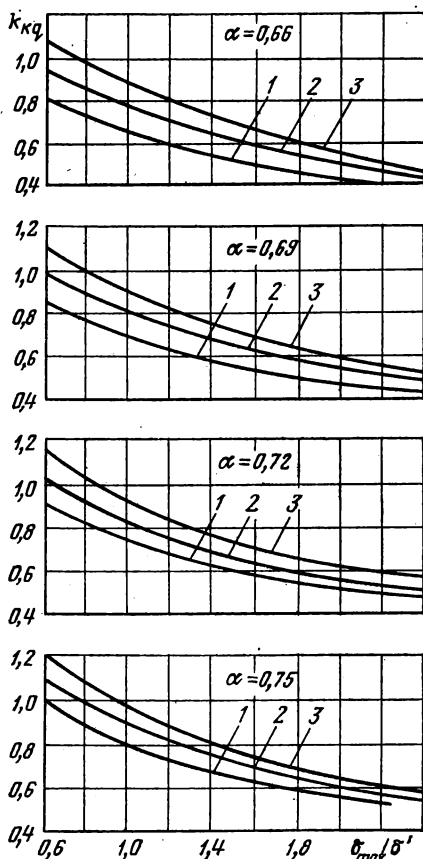


Рис. 24.59. 1 — $\delta'/\tau = 0,01$; 2 — $\delta'/\tau = 0,03$; 3 — $\delta'/\tau = 0,05$

24.22. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИВЕДЕНИЯ РОТОРНЫХ КОНТУРОВ

Анализ электромагнитных процессов в синхронной машине в переходных и несимметричных режимах работы упрощается, если величины обмоток ротора приведены к обмотке статора. Под приведенным (мгновенным) током роторного контура понимается амплитуда симметричной системы синусоидальных токов в фазах статора, которые образуют такую же основную гармоническую индукции магнитного поля в зазоре, как и роторный контур. Под приведенным сопротивлением роторного контура понимается такое сопротивление фаз обмотки статора, при котором приведенный ток выделяет во всех фазах обмотки статора такую же мощность, как и в рассматриваемом контуре.

Приведенные параметры вычисляются путем умножения неприведенного параметра на коэффициент приведения ($I'_f = m_{If} I_f$; $U'_f = m_{Uf} U_f$; $r'_f = m_{rf} r_f$ и т. д.).

Коэффициенты приведения токов и сопротивлений для обмотки возбуждения и эквивалентированных демпферных контуров:

$$\begin{aligned} m_{If} &= \frac{2\pi (2p\omega_f) k_f}{4m_1 \omega_1 k_{w1} k_d}; \\ m_{zf} &= \frac{m_1}{2} \left(\frac{\omega_1 k_{w1}}{2p\omega_f} \right)^2 \left(\frac{4k_d}{\pi k_f} \right)^2; \\ m_{Ikd} &= \frac{2\pi (2p\omega_3) k_{kd}}{4m_1 \omega_1 k_{w1} k_d}; \\ m_{zkd} &= \frac{m_1}{2} \left(\frac{\omega_1 k_{w1}}{2p\omega_3} \right)^2 \left(\frac{4k_d}{\pi k_{kd}} \right)^2; \\ m_{Ikq} &= \frac{2\pi (2p\omega_3) k_{kq}}{4m_1 \omega_1 k_{w1} k_q}; \\ m_{zkq} &= \frac{m_1}{2} \left(\frac{\omega_1 k_{w1}}{2p\omega_3} \right)^2 \left(\frac{4k_q}{\pi k_{kq}} \right)^2. \end{aligned}$$

Коэффициент приведения для напряжений

$$\begin{aligned} m_{Uf} &= m_{zf} m_{If}; & m_{Ukd} &= m_{zkd} m_{Ikd}; \\ m_{Ukq} &= m_{zkq} m_{Ikq}. \end{aligned}$$

24.23. СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

При анализе работы синхронных машин обычно используют систему относительных единиц. Запись уравнений в системе относительных единиц оказывается особенно удобной при исследовании переходных процессов.

В качестве базовых значений для обмотки статора принимаются номинальный фазный ток, номинальное фазное напряжение и номинальная полная мощность машины.

Для представления величины в относительных единицах ее выражают в долях соответствующего базового значения:

$$\begin{aligned} I_* &= I/I_0; & U_* &= U/U_0; & S_* &= S/S_0; \\ Z_* &= Z/Z_0. \end{aligned}$$

Если рассматривают переходные процессы, то в относительных единицах выражают и мгновенные значения величин (или их проекций на те или иные оси, например на ось d или q), причем за базовые значения токов и напряжения принимают амплитуды номинальных величин:

базовое напряжение

$$U_6 = \sqrt{2} U_{\text{ном}} = 2\pi f \omega_1 k_{w1} \Phi_1;$$

базовый ток

$$I_6 = \sqrt{2} I_{\text{ном}} = \frac{\pi p F_a}{m_1 \omega_1 k_{w1}};$$

базовая мощность

$$S_6 = 3U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = 3U_6 I_6/2,$$

где Φ_1 — магнитный поток по основной гармонической индукции при номинальном напряжении и холостом ходе; F_a — амплитуда основной гармонической МДС при номинальном токе.

Если рассматривают установившиеся процессы и в относительных единицах выражают действующие значения величин, то за базовые значения принимают действующие значения номинальных величин ($U_6 = U_{\text{ном}}$; $I_6 = I_{\text{ном}}$).

Базовые сопротивления (для фазы обмотки статора)

$$Z_6 = \frac{U_6}{I_6} = \frac{4m_1}{\pi} f \frac{(\omega_1 k_{w1})^2}{p} \times \left(\frac{\tau l_\delta \mu_0}{\delta k_\delta} \right) \frac{F_\delta k_f}{F_a},$$

или

$$Z_6 = 2m_1 f \frac{(\omega_1 k_{w1})^2}{p} \frac{\Phi_1}{F_a} = \frac{2\sqrt{2} m_1 f \omega_1^2 k_{w1} l_\delta}{p} \frac{B_{\delta f1}}{A},$$

где F_δ — магнитное напряжение зазора при холостом ходе и номинальном напряжении (см. § 24.26); $B_{\delta f1}$ — амплитуда основной гармонической индукции в зазоре при тех же условиях; A — линейная нагрузка статора (см. § 23.21).

Для того чтобы выразить в относительных единицах величины и параметры роторных контуров, их нужно предварительно привести к обмотке статора путем умножения на коэффициенты приведения (см. § 24.22), например

$$I_{*f} = \frac{I'_f}{I_6} = \frac{m_{1f} I_f}{I_6} = \frac{I_f}{I_{6f}};$$

$$r_{*f} = \frac{r'_f}{Z_6} = \frac{m_{2f} r_f}{Z_6} = \frac{r_f}{Z_{6f}} \text{ и т. д.}$$

Как видно из приведенных формул, для выражения в относительных единицах какого-либо параметра роторного контура можно обойтись без его приведения к обмотке статора. Для этого достаточно разделить его на соответствующее базовое значение этого контура ($I_{6f} = I_6/m_{1f}$; $Z_{6f} = Z_6/m_{2f}$ и т. д.).

24.24. ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

1. Главное индуктивное сопротивление обмотки якоря.

а) Главное индуктивное сопротивление якоря неявнополюсной машины

$$x_a = x_{ad} = x_{aq} = \frac{4m_1}{\pi} f \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\delta k_\delta k_H} \frac{(\omega_1 k_{w1})^2}{p},$$

где k_H — коэффициент насыщения магнитной цепи (см. § 24.26).

б) Главное индуктивное сопротивление якоря явнополюсной машины по продольной оси (без учета насыщения)

$$x_{ad} = \frac{4m_1}{\pi} f \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\delta k_\delta} \frac{(\omega_1 k_{w1})^2}{p} k_d,$$

по поперечной оси (без учета насыщения)

$$x_{aq} = \frac{4m_1}{\pi} f \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\delta k_\delta} \frac{(\omega_1 k_{w1})^2}{p} k_q.$$

в) Индуктивные сопротивления явнополюсной машины с учетом насыщения

$$x_{adH} = x_{ad} \kappa_d; \quad x_{aqH} = x_{aq} \kappa_q;$$

где $\kappa_d, \kappa_q = f(k_{za})$ учитывают влияние насыщения магнитной цепи (см. рис. 24.60); k_{za} — см. § 24.26.

г) Сопротивления x_{adH}, x_{aqH} в относительных единицах:

для неявнополюсной машины

$$x_{*a} = \frac{k_a F_a}{k_H F_\delta};$$

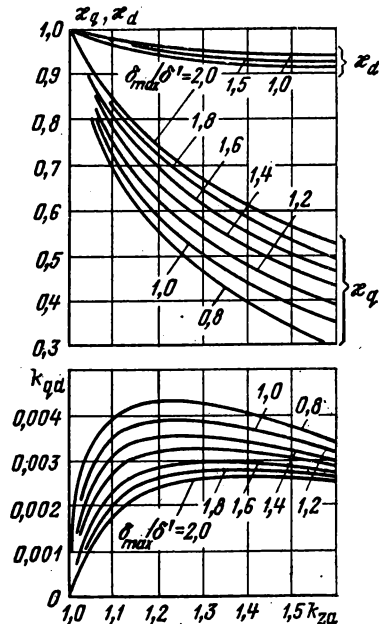


Рис. 24.60

для явнополюсной машины

$$x_{*adn} = \frac{k_{ad} F_a}{F_\delta} x_d; \quad x_{*aqn} = \frac{k_{aq} F_a}{F_\delta} x_q.$$

2. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря обозначается x_σ и определяется по § 23.29, п. 2, если при расчете коэффициента проводимости дифференциального рассеяния λ_d и лобового рассеяния λ_l учесть особенности устройства синхронной машины.

а) Коэффициент k_a , учитывающий влияние явнополюсности ротора на λ_d (см. § 23.29, п. 2). Для неявнополюсной машины $k_a = 1$, для явнополюсной

$$k_a = \frac{2\alpha_\delta}{1 + k_q/k_d}.$$

б) Коэффициент ξ в формуле для расчета коэффициента проводимости дифференциального рассеяния (см. § 23.29, п. 2).

Для неявнополюсной машины и явнополюсной машины с демпферной обмоткой на роторе определяется по формулам для асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (см. § 24.5, п. 1), в которых Z_2 следует понимать как $\pi D/t_{z2}$, где t_{z2} — зубцовое деление демпферной обмотки на полюсе (для явнополюсной машины) или зубцовое деление малых зубцов (для неявнополюсной машины).

Для явнополюсной машины без демпферной обмотки с набранными из листов полюсами ξ определяется по формулам для асинхронной машины с фазным ротором (см. § 24.5, п.1).

в) Коэффициент λ'_l в формуле для расчета коэффициента проводимости лобового рассеяния (см. § 23.29, п. 2) зависит от взаимного расположения обмоток статора и ротора, типа обмотки (ниже приводятся формулы для двухслойных обмоток) и фазы составляющей тока, для которой он определяется (для продольного тока он имеет одно значение, для поперечного — другое):

для продольного тока $\lambda'_{ld} = \lambda_{11d} - k_\lambda \lambda_{21d}$;

для поперечного тока $\lambda'_{lq} = \lambda_{11q}$,

где $k_\lambda = \frac{2m_i}{\pi} q_1 \frac{k_{w1} k_d}{k_f}$ — коэффициент приведения проводимостей.

Для явнополюсной машины

$$\lambda_{11d} = 2,65 q_1^2 k_{p\lambda} k_{\beta\lambda}; \quad \lambda_{11q} = 2,57 q_1^2 k_{p\lambda} k_{\beta\lambda};$$

$$\lambda_{21d} = k_{p\lambda} k'_\beta \lambda'_{21d},$$

где $k_{p\lambda}$, $k_{\beta\lambda}$ — по § 24.5; $k'_\beta = 1/k_{\beta\lambda}$; λ'_{21d} зависит от $h_{\beta 1}/\tau$.

$h_{\beta 1}/\tau$	0,6	0,5	0,4	0,25
λ_{21d}/q_1	0,85	0,93	1,1	1,27

Для неявнополюсной машины с немагнитными бандажными кольцами на лобовых частях ротора

$$\lambda_{11q} = \lambda_{11d} = 2,4 q_1^2 k_{p\lambda} k_{\beta\lambda};$$

$$\lambda_{21d} = 0,8 q_1 k_{p\lambda} k'_\beta k_a k_h.$$

Примечание. Размер $h_{\beta 2}$, необходимый для расчета коэффициента k_h , считается разным вылету лобовых частей обмотки ротора.

г) Коэффициент проводимости лобового рассеяния рассчитывается по среднеарифметическому значению величин λ'_{ld} и λ'_{lq} :

$$\lambda_l = \frac{l_s}{2q_1 l_\delta} \left(\frac{\lambda'_{ld} + \lambda'_{lq}}{2} \right), \quad \text{где } l_s \text{ — см. § 24.5.}$$

д) Индуктивное сопротивление рассеяния статора (в относительных единицах)

$$x_{*\sigma} = \frac{\pi^2}{k_{w1}^2 k_d} \left(\frac{\lambda_i}{m_i q_i} \right) \left(\frac{\delta k_\delta}{\tau} \right) x_{*ad} \approx 0,03 \div 0,20,$$

где $\lambda_i = \lambda_{l\Psi} + \lambda_l + \lambda_d$.

3. Индуктивное сопротивление Потье. Фиктивное индуктивное сопротивление рассеяния статора, используемое при построении векторных диаграмм с учетом насыщения, называют сопротивлением Потье:

$$x_{*P} = x_{*\sigma} + (x'_{*d} - x_{*\sigma}) \frac{F_m}{F_m + F_{z1}} \approx \approx (0,8 \div 0,85) x'_{*d},$$

где F_m , F_{z1} — см. § 24.26; x'_{*d} — см. § 24.31.

4. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения.

а) Явнополюсные машины

$$x_{*f\sigma} = \frac{2k_{ad}}{k_f} (\lambda_{fd} + \lambda_{f\Psi} + \lambda_{fl}) \left(\frac{\delta k_\delta}{\tau} \right) x_{*ad},$$

$$\text{где } \lambda_{fd} = \frac{k_f}{2k_{ad}} \left(\frac{\tau}{\delta k_\delta} \right) \left(\frac{4}{\pi} k_{ad} k_\Phi - 1 \right)$$

— коэффициент проводимости дифференциального рассеяния (на один полюс);

$$\lambda_{f\Psi} = 4 (\lambda_{f\Psi} + \lambda_{fr}) \frac{l'_m}{l_\delta} =$$

$$= \left(\lambda_p + \frac{\lambda_{mn}}{1,53} \right) \frac{l'_m}{l_\delta}$$

— коэффициент проводимости для потоко-сцепления пазового рассеяния и рассеяния по головкам полюсов (на один полюс); $l'_m = l_m + 2l_{m,\beta}$ — расчетная длина сердечника полюса; $l_{m,\beta}$ — расчетная длина нажимной щеки полюса; $\lambda_{fn} = \lambda_{mn}/2,65$ — коэффициент проводимости для потоко-сцепления рассеяния лобовых частей (на один полюс) обмотки возбуждения; $\lambda_{f\Psi} + \lambda_{fr}$ — коэффициент проводимости для потоко-сцепления пазового рассеяния и рассеяния наконечников полюсов (на один паз);

$$\lambda_p = 4,44 \left(\frac{d_t}{c_p} - 0,25 \right) + 1,75 \left(\frac{a_p}{c_p} + 0,2 \right) - 1,27 \left(\frac{a_p}{c_p} - 0,5 \right)^2;$$

$$\lambda_{mn} = \frac{1,75 h_m}{c_m}; \quad \lambda_{ml} = \frac{1,17 b_m}{l_\delta};$$

$$a_p = (b_p - b_m)/2; \quad c_p = \tau - b_p - \frac{\pi d_t}{p};$$

$$d_t = h_p + \delta - b_p^2/4D;$$

$$c_m = \tau - b_m - \pi(h_m + 2h_p + 2\delta)/2p.$$

Примечания: 1. При $d_t/c_p < 0,25$ первый член в выражении для λ_p отбрасывается.

2. Обозначения в приведенных формулах соответствуют обозначениям на рис. 24.22.

б) **Неявнополюсные машины.** Сопротивление $x_{*f\sigma}$ рассчитывается по той же формуле ($k_{ad} = 1/k_f$), но коэффициенты проводимости должны быть определены по следующим формулам:

$$\lambda_{fd} = \frac{k_f^2}{2} \left(\frac{\tau}{\delta k_\delta} \right) \left[2 \frac{\left(1 - \frac{2}{3} \gamma \right)}{k_f} - 1 \right];$$

$$\lambda_{f\psi} = \frac{8p}{Z_2} (\lambda_{f\psi\psi} + \lambda_{f\tau}) \frac{l_2}{l_\delta}; \quad \lambda_{f\pi} = 0,2 \frac{\tau}{l_\delta},$$

где $\lambda_{f\psi\psi}$ — коэффициент проводимости для потокосцепления пазового рассеяния; $\lambda_{f\tau} \approx 0,2 + \delta/2l_{z2}$ — коэффициент проводимости для потока рассеяния по головкам зубцов ротора.

5. **Индуктивные сопротивления рассеяния демпферной обмотки** (для явнополюсной машины).

а) По продольной оси

$$x_{*к\sigma d} = 2 \frac{k_{ad}}{k_f} (\lambda_{pd} + \lambda_{dd} + \lambda_{\pi d}) \left(\frac{\delta k_\delta}{\tau} \right) x_{*ad},$$

где $\lambda_{pd} = \frac{2\pi(\lambda_{к,п\psi} + \lambda_{к,г}) l_p}{n_k(1 - k_{о,к}) l_\delta}$ — коэффициент

проводимости для потокосцепления пазового рассеяния и рассеяния по головкам зубцов демпферной обмотки (на один полюс по продольной оси);

$$\lambda_{dd} = \frac{2\pi\lambda_{кd} l_p}{n_k(1 - k_{о,к}) l_\delta}$$

— коэффициент проводимости для потока рассеяния лобовых частей демпферной обмотки (на один полюс по продольной оси);

$$\lambda_{\pi d} = 0,2 \frac{\tau}{l_\delta(1 - k_{о,к})}$$

— коэффициент проводимости для потока рассеяния лобовых частей демпферной обмотки (на один полюс по продольной оси);

$k_{о,к} = \frac{\sin n_k \alpha_k}{n_k \sin \alpha_k}$ — коэффициент распределения

демпферной обмотки ($\alpha_k = \pi l_{z2}/\tau$); $\lambda_{к,п\psi}$ — коэффициент проводимости для потокосцепления пазового рассеяния демпферной обмотки на один паз, определяется по формулам § 23.29 для λ_{π} ; $\lambda_{к,г}$ — коэффициент проводимости для рассеяния по головкам зубцов демпферной обмотки, рассчитывается так же, как и коэффициент λ_{τ} (см. § 23.29), если учесть явнополюсность введением в формулы среднего зазора

$$\delta_{cp} = \delta + (\delta_{max} - \delta)/3;$$

$\lambda_{к,д} = t_{z2}/12\delta k_\delta$ — коэффициент проводимости

дифференциального рассеяния демпферной обмотки (на один стержень); n_k — число стержней на полюс.

б) По поперечной оси (если имеются полные короткозамыкающие кольца, соединяющие электрически все стержни ротора)

$$x_{*к\sigma q} = 0,75 x_{*к\sigma d}.$$

в) По поперечной оси (если имеются только короткозамыкающие сегменты, соединяющие электрические стержни в пределах одного полюса)

$$x_{*к\sigma q} = 4 x_{*к\sigma d}.$$

6. **Индуктивное сопротивление нулевой последовательности**

$$x_{*0} = \frac{\pi^2}{k_{w1}^2 k_d} \left(\frac{\lambda_{\pi 0} + \lambda_{\pi 0} + \lambda_{\pi 0}}{m_1 q_1} \right) \left(\frac{\delta k_\delta}{\tau} \right) x_{*ad},$$

где $\lambda_{\pi 0} = \lambda_{\pi\psi} k_{\beta 0}/k_\beta$ — коэффициент проводимости для потокосцепления пазового рассеяния при токах нулевой последовательности ($\lambda_{\pi\psi}$ — см. § 23.29);

$$k_{\beta 0} = 3\beta - 2; \quad k_\beta = \frac{1 + 3\beta}{4};$$

$$\lambda_{\pi 0} = k_{\pi 0} \frac{\sqrt{2} k_{\beta 0} k_{p1}^2 m_1 q_1}{2\pi^2} \left(\frac{\tau}{\delta k_\delta} \right) \times \\ \times \left[\frac{1}{(3q_1)^2} + 0,13 k_{\beta 0} - 0,11 k_{\beta 0}^2 + 0,037 \right]$$

— коэффициент проводимости для дифференциального рассеяния при токах нулевой последовательности (для явнополюсной машины без демпферной обмотки $k_{\pi 0} = 1$; для явнополюсной машины с демпферной обмоткой или с массивными полюсами $k_{\pi 0} = 0,5$); $\lambda_{\pi 0} = 0,155 \times q_1 k_{p1} k_{\beta 1} l_S/l_\delta$ — коэффициент проводимости для лобового рассеяния при токах нулевой последовательности (k_{p1} , $k_{\beta 1}$ — см. § 24.5).

24.25. АКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

1. **Активное сопротивление фазы обмотки якоря** r_a при температуре t , °C:

а) в абсолютных единицах определяется в § 23.28;

б) в относительных единицах

$$r_{*a} = \frac{\pi^2 k_r \rho_t l_{cp}}{(S_1 u_{\pi 1} q_1 m_1) l_\delta} \left(\frac{\delta k_\delta}{\mu_0 k_{w1}^2 k_d \tau} \right) \frac{x_{*ad}}{\omega},$$

где S_1 — сечение эффективного провода обмотки; $u_{\pi 1}$ — число эффективных проводов в пазу; l_{cp} — средняя длина полувитка (см. § 23.28); k_r — коэффициент увеличения сопротивления (см. § 23.28).

2. **Сопротивление обмотки возбуждения** при температуре t , °C.

а) В абсолютных единицах

$$r_f = \frac{4\rho_t \rho_{wf} l_f}{S_f};$$

б) В относительных единицах

$$r_{*f} = \frac{8\rho_t l_f}{(2S_f w_f) l_\delta} \left(\frac{k_{ad} \delta k_\delta}{\mu_0 k_f \tau} \right) \frac{x_{*ad}}{\omega},$$

где S_f — сечение эффективного проводника обмотки возбуждения; l_f — средняя длина полувитка.

3. Сопротивление демпферной обмотки явнополюсной машины при температуре t , °С.

а) По продольной оси

$$r_{*kd} = \frac{\pi^2 \rho_{ct} l_c c_{kd}}{(1 - k_{o,k}) n_k S_c l_\delta} \times \left(\frac{k_{ad} \delta k_\delta}{\mu_0 k_f \tau} \right) \frac{x_{*ad}}{\omega},$$

где

$$c_{kd} = 1 + 0,217 \frac{\rho_{kt}}{\rho_{ct}} \left(\frac{n_k S_c}{S_k} \right) \left(\frac{n_k t_{z2}}{l_c} \right)$$

— коэффициент, учитывающий влияние сопротивления короткозамыкающих элементов для продольных токов; ρ_{ct} — удельное сопротивление материала стержней обмотки; ρ_{kt} — удельное сопротивление материала короткозамыкающих колец или сегментов; S_c — сечение стержня; n_k — число стержней на полюс; S_k — сечение кольца или сегмента; $k_{o,k}$ — см. § 24.24, п. 5.

б) По поперечной оси (для полных короткозамыкающих колец)

$$r_{*kq} = 0,75 \frac{c_{kq}}{c_{kd}} r_{*kd},$$

$$\text{где } c_{kq} = 1 + 0,434 \frac{\rho_{kt}}{\rho_{ct}} \left(\frac{n_k S_c}{S_k} \right) \left(\frac{n_k t_{z2}}{l_c} \right)$$

— коэффициент, учитывающий влияние короткозамыкающих элементов для поперечных токов.

в) По поперечной оси (для короткозамыкающих сегментов только на полюсе)

$$r_{*kq} = (8 \div 12) r_{*kd}.$$

24.26. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

Выполняется для определения тока возбуждения I_f и МДС возбуждения $F_f = I_f w_f$, которые образуют поле с потоком взаимной индукции Φ , индуктирующим в обмотке якоря заданную ЭДС E_f . Расчет ведется обычно при $E_f = 0,5 U_{ном}$; $U_{ном}$; $k_E U_{ном}$; $1,2 U_{ном}$, где $k_E = \sqrt{1 + x_{*s} (2 \sin \varphi + x_{*s})}$ (для генераторов — $k_E \approx 1,08$, для двигателей $k_E \approx 1,06$; для компенсаторов $k_E \approx 1,13$).

Магнитная цепь синхронной машины (см. рис. 24.22) разбивается, также как и в асинхронной машине, на участки (см. § 24.6). При ЭДС возбуждения $E_f = k_E U_{ном}$ индукции в стальных участках не должны превосходить значений, указанных в табл. 24.16.

Порядок расчета. а) По заданной ЭДС E_f определяется магнитный поток взаимной индукции Φ :

$$\Phi = \frac{E_f}{4k_B f w_1 k_{w1}}.$$

Таблица 24.16. Значения магнитных индукций (при номинальной нагрузке) для синхронных машин

Участки магнитной цепи	Обозначение	Индукция B , Тл	
		Явнополюсные машины	Двухполюсные турбогенераторы
Ярмо статора	B_{a1}	1,35—1,5	1,4—1,5
Зубцы статора	B'_{z1}	1,8—1,9	1,9—2,1
	B_{z1}	1,6—1,8	1,40—1,55
Зубцы ротора	B'_{z2}	—	1,9—2,2
	B_{z2}	—	1,6—1,7
Сердечник полюса	B_m	1,5—1,7	—

Примечание. B'_{z1} и B'_{z2} — индукции в наиболее узких сечениях; B_{z1} и B_{z2} — в расчетных сечениях зубцов статора и ротора.

б) Магнитные напряжения зубцов статора F_{z1} , ярма статора F_{a1} и воздушного зазора $F_\delta = B_\delta \delta k_\delta / \mu_0$ определяются по тем же формулам, что и в асинхронных машинах (см. § 24.6).

Коэффициенты k_B для расчета потока Φ и α_δ для расчета B_δ определяются по § 24.20 с учетом насыщения при предварительно выбранных коэффициентах k_{za} в явнополюсных и k_z в неявнополюсных машинах ($k_z \approx k_{za} \approx 1,0 \div 1,4$).

Для явнополюсных машин $\delta = \delta_{min}$ и $k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2}$ определяется для $\delta_{cp} = \delta + (\delta_{max} - \delta)/3$ (при отсутствии демпферной обмотки $k_{\delta 2} = 1$); для неявнополюсных машин $k_\delta = k_{\delta 3} [k_{\delta 1} k_{\delta 2} \gamma + k_{\delta 1} (1 - \gamma)]$; $k_{\delta 3} \approx 1,01 \div 1,04$ учитывает рифление поверхности ротора; $\gamma = Z_2 / Z'_2$.

Формулы для расчета коэффициентов зазора k_δ можно найти в § 23.26, п. 6. Коэффициент $k_{\delta 2}$ учитывает зубчатость сердечника ротора (в явнополюсных машинах — зубчатость наконечников полюсов, образованную пазами демпферной обмотки).

в) Определяется магнитное напряжение статора и зазора

$$F_1 = F_\delta + F_{z1} + F_{a1}$$

и коэффициент насыщения $k_{za} = F_1 / F_\delta$ (в явнополюсной машине), $k_z = (F_\delta + F_{z1}) / F_\delta$ (в неявнополюсной машине). Если коэффициент насыщения значительно отличается от принятого ранее, расчет по пунктам «а» — «в» повторяют.

Особенности расчета явнополюсных машин.

а) Коэффициент рассеяния полюсов при холостом ходе

$$\sigma_m = 1 + \mu_0 \lambda_{f\Phi} F_1 l_\delta / \Phi,$$

где $\lambda_{f\Phi} = (\lambda_p + \lambda_{mn}) \frac{l'_m}{l_\delta} + \lambda_{mл}$ — коэффициент проводимости для потока рассеяния полюсов (λ_p , λ_{mn} , $\lambda_{mл}$ и l'_m — см. § 24.24, п. 4).
б) Индукция в сердечниках полюсов (см. рис. 24.22)

$$B_m = \frac{\Phi_m}{k_{mc} l'_m b_m},$$

где $\Phi_m = \Phi \sigma_m$; $k_{mc} = 0,95$ при полюсах, собранных из стальных листов толщиной 1–2 мм.

в) Магнитное напряжение полюсов $F_m = H_m h_m$, где $H_m = f(B_m)$ определяется по кривой намагничивания стали.

г) Индукция в ярме ротора (см. рис. 24.22)

$$B_{a2} = \frac{\Phi_m}{2h_{a2} l_{a2m} k_a},$$

где $l_{a2m} = l'_{a2}(n_{a2} + 1)$; n_{a2} — число радиальных вентиляционных каналов в ярме (обод).

д) Магнитное напряжение ярма

$$F_{a2} = H_{a2} L_{a2},$$

где $H_{a2} = f(B_{a2})$ определяется по кривой намагничивания стали ярма, L_{a2} — по эскизу ярма (см. рис. 24.22).

е) Магнитное напряжение стыка между полюсами и ярмом ротора

$$F_{\delta m} = 225 B_m^2.$$

ж) Магнитное напряжение ротора

$$F_2 = F_m + F_{\delta m} + F_{a2}.$$

Особенности расчета неявнополюсных машин. а) Магнитный поток в роторе определяется с учетом рассеяния обмотки возбуждения $\Phi_m = \Phi \sigma_m$, где σ_m рассчитывается по формуле для явнополюсной машины, если коэффициент $\lambda_{f\Phi}$ рассчитывать по формуле

$$\lambda_{f\Phi} = \frac{8\rho}{Z_2} (\lambda_{f\Phi} + \lambda_{f\Gamma}) \frac{l_2}{l_\delta},$$

где $\lambda_{f\Phi} = h_1/2b_{n2} + h_2/b_{n2}$ — коэффициент проводимости для потока пазового рассеяния (по рис. 24.23); $\lambda_{f\Gamma}$ — см. § 24.24; l_2 — см. рис. 24.23.

б) Индукция в зубцах ротора определяется в их расчетном сечении на поверхности с диаметром (см. рис. 24.23):

$$D_{0,2} = D_2 - 2h_{z2} + 2 \cdot 0,2h_{z2}.$$

Расчетное сечение большого зубца

$$S_{z\phi} = b_{z\phi} l_2,$$

где $b_{z\phi} = \frac{(1-\gamma)}{2\rho} \pi D_{0,2} - n_{z2} b_{z2}$; n_{z2} , b_{z2} — число и ширина аксиальных каналов большого зубца (см. рис. 24.23); $\gamma = Z_2/Z_2'$.

Расчетное сечение малых зубцов

$$S_{zm} = \frac{Z_2}{2\rho} b_{zm} l_2 k,$$

$$\text{где } b_{zm} = \frac{\pi D_{0,2} \gamma}{Z_2} - b_{n2};$$

$$k = \left(1 - \cos \gamma \frac{\pi}{2}\right) \frac{2}{\gamma \pi}.$$

Полное расчетное сечение зубцов $S_z = S_{z\phi} + S_{zm}$.

Кажущаяся индукция в расчетном сечении зубца

$$B_{z2} = \Phi_m / S_z.$$

Если $B_{z2} > 1,8$ Тл, то действительную индукцию $B_{z2д}$ следует определять по § 24.6 (см. рис. 24.8, 24.9) с помощью коэффициента

$$k_{пх} = \frac{\pi D_{0,2} l_2 (1 - \gamma + \gamma k)}{2\rho S_z} - 1.$$

в) Магнитное напряжение зубцов ротора

$$F_{z2} = h_{z2} H_{z2},$$

где $H_{z2} = f(B_{z2д})$ определяется по кривой намагничивания для роторной стали (см. рис. 24.8, 24.9).

г) Магнитное напряжение ярма ротора

$$F_{a2} = L_{a2} H_{a2};$$

где

$$H_{a2} = f(B_{a2});$$

$$B_{a2} = \frac{\Phi_m}{l_2(D_2 - 2h_{z2} - d_0)};$$

$$L_{a2} = \frac{D_2 - 2h_{z2}}{2} \sin \frac{\pi}{2\rho}$$

или по эскизу ярма (см. рис. 24.23).

д) Магнитное напряжение ротора

$$F_2 = F_{z2} + F_{a2}.$$

Результирующая МДС возбуждения (для явнополюсных и неявнополюсных машин)

$$F_f = I_f \omega_f = F_1 + F_2 = k_n F_\delta;$$

где k_n — коэффициент насыщения магнитной цепи.

По результатам расчета магнитной цепи строятся *характеристика холостого хода и характеристики намагничивания*. Характеристикой холостого хода называется зависимость ЭДС взаимной индукции E_f от тока возбуждения I_f или МДС возбуждения F_f .

К характеристикам намагничивания относятся *основная характеристика намагничивания* $\Phi = f(F_f)$, *переходная характеристика намагничивания* $\Phi = f(F_1)$, *характеристика намагничивания сердечника ротора* $\Phi_m = f(F_2)$ и *характеристика намагничивания для потока рассеяния* $\Phi_{f\sigma} = f(F_1)$, где $\Phi_{f\sigma} = \Phi_m - \Phi$.

Характеристики намагничивания и холостого хода можно представить в относительной форме, приняв за базовые значения номинальное напряжение $U_{ном}$, магнитный поток Φ_* и МДС возбуждения $F_{f*} = I_{f*} \omega_f$, соответствующие $E_f = U_{ном}$ при холостом ходе. Характеристика холостого хода $E_{*f} = f(F_{*f})$ и основная характеристика намагничивания $\Phi_* = f(F_{*f})$ в относительных единицах совпадают.

Таблица 24.17. Нормальные характеристики холостого хода синхронных генераторов (Т — турбогенераторов, Г — гидрогенераторов)

$I_{*f} = I_f / I_{fx}$		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$E_{*f} =$	Т	0,58	1,00	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
$E_f / U_{ном}$	Г	0,53	1,00	1,23	1,30	—	—	—

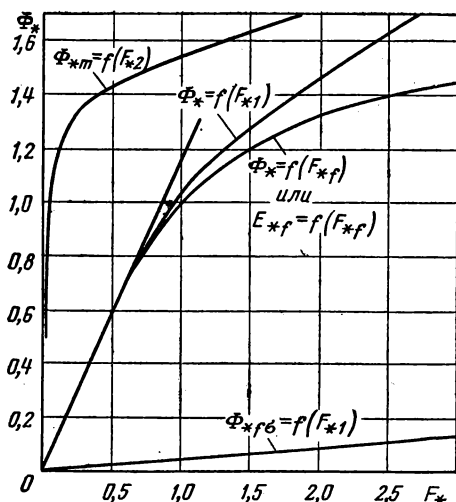


Рис. 24.61. Нормальные характеристики намагничивания синхронной машины

Усредненные характеристики намагничивания и холостого хода, называемые *нормальными характеристиками*, приведены на рис. 24.61 и в табл. 24.17.

24.27. РАСЧЕТ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ НАГРУЗКЕ. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Ненасыщенная неявнополюсная синхронная машина. В ненасыщенной машине падением магнитного напряжения в стальных участках можно пренебречь. При таком допущении результирующее поле машины можно определить как сумму полей, образованных независимо током возбуждения I_f и током якоря I , а результирующую ЭДС в обмотке якоря — как сумму ЭДС, индуцированных отдельными составляющими поля. На рис. 24.62 приведена векторная диаграмма ненасыщенной неявнополюсной синхронной машины, работающей в генераторном режиме на активно-индуктивную нагрузку. Диаграмма соответствует уравнению напряжений фазы якоря

$$\underline{E}_r = \underline{E}_a + \underline{E}_f = \underline{U} + r_a \underline{I} + jx_\sigma \underline{I},$$

где $\underline{E}_f$ — ЭДС от поля возбуждения; $\underline{E}_a = -jx_a \underline{I}$ — ЭДС от поля якоря.

МДС возбуждения F_f и реакции якоря F_{af} определяются по спрямленной характеристике холостого хода (рис. 24.62).

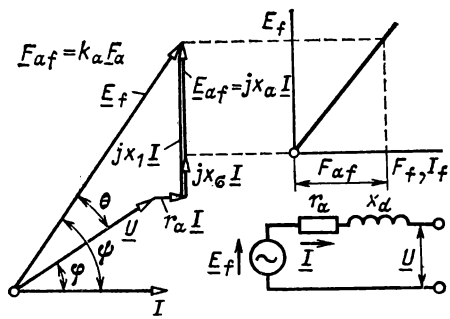


Рис. 24.62

Для грубой оценки векторная диаграмма рис. 24.62 может быть использована при расчете насыщенной машины.

Насыщенная неявнополюсная синхронная машина. а) Без учета изменения потока рассеяния обмотки возбуждения расчет заданного режима нагрузки производится с помощью характеристики холостого хода (см. § 24.26) и векторной диаграммы, соответствующей уравнению напряжений фазы якоря

$$\underline{E}_r = \underline{U} + r_a \underline{I} + jx_\sigma \underline{I}$$

и уравнению МДС

$$\underline{F}_f = \underline{F}_r - \underline{F}_{af},$$

где $\underline{E}_r$, $\underline{F}_r$ — результирующие ЭДС и МДС; $\underline{F}_{af}$ — см. § 24.20.

МДС $\underline{F}_r$ соответствует ЭДС $\underline{E}_r$ и определяется по характеристике холостого хода (рис. 24.63, б); $\underline{F}_{af}$ рассчитывается по § 24.20 или по спрямленной характеристике холостого хода (см. рис. 24.62); $\underline{F}_f$ определяется по диаграмме МДС (рис. 24.63, а), а соответствующая ей ЭДС $\underline{E}_f$ — по характеристике холостого хода $E_f = f(F_f)$.

Изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U [\%] = \frac{E_f - U}{U} 100.$$

Примечания: 1. Метод расчета может быть также использован для приближенного определения тока возбуждения явнополюсных синхронных машин (в этом случае следует определить $\underline{F}_{af}$ по формуле $\underline{F}_{af} = k_{ad} \underline{F}_a$, где k_{ad} — по § 24.20).

2. С целью косвенно учесть увеличение потока рассеяния при нагрузке обычно вместо сопротивления x_σ вводится индуктивное сопротивление Потье x_p (см. § 24.24).

б) Более точный расчет режима нагрузки насыщенной неявнополюсной синхронной машины с учетом изменения потока рассеяния

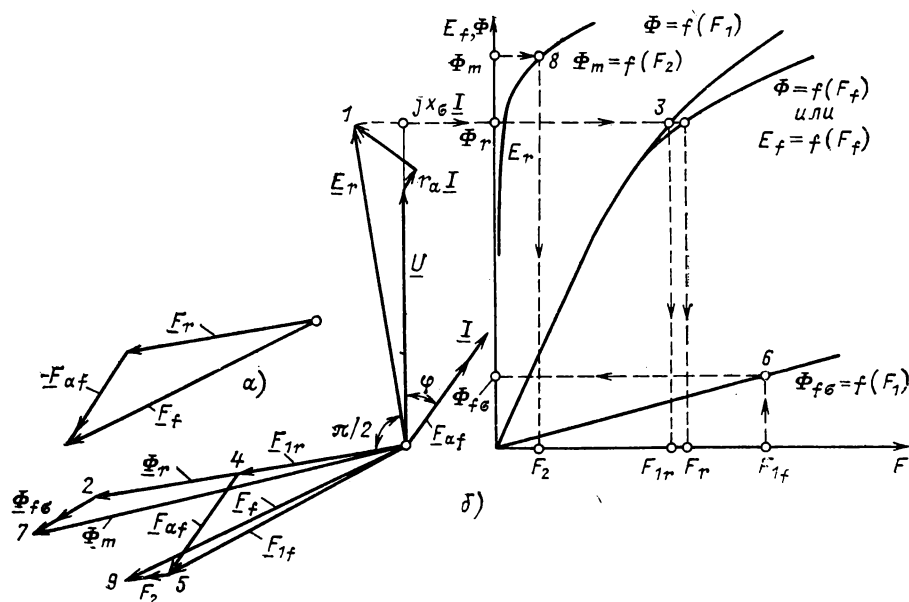


Рис. 24.63

обмотки возбуждения производится с помощью частичных характеристик намагничивания (рис. 24.63, б), найденных по § 24.26. Порядок построения диаграммы МДС и потоков указан на рис. 24.63, б цифрами. К показанному на рисунке добавим, что поток Φ_r опережает ЭДС E_r на угол $\pi/2$, поток $\Phi_{f\sigma}$ совпадает по фазе с МДС F_{1f} , МДС F_2 совпадает по фазе с Φ_m . Построение диаграммы и характеристик намагничивания удобно производить в относительных единицах. Использование частичных характеристик намагничивания позволяет рассчитать МДС F_{1f} , по которой определяется поток $\Phi_{f\sigma}$ с учетом данного режима нагрузки, и, таким образом, более точно рассчитать поток в роторе Φ_m , МДС ротора F_2 и МДС возбуждения F_f .

Ненасыщенная явнополюсная синхронная машина анализируется при том же допущении, что и ненасыщенная неявнополюсная машина. Это дает возможность независимо рассматривать поле возбуждения и поле от продольного (I_d) и поперечного (I_q) токов якоря и определять индуцированные ими ЭДС по спрямленной в начале координат характеристике холостого хода (E_f) или по соответствующим ЭДС взаимной индукции (E_{aq} и E_{ad}). Суммарная ЭДС в уравнении напряжений определяется как сумма ЭДС E_f , E_{aq} и E_{ad} :

$$\underline{E}_f + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} = \underline{U} + r_a \underline{I} + jx_{\sigma} \underline{I},$$

где $E_{ad} \sim F_{ad} = k_{ad} F_a \sin \psi \sim k_{ad} I_d$;

$$\underline{E}_{ad} = -jx_{ad} \underline{I}_d;$$

$$E_{aq} \sim F_{aq} = k_{aq} F_a \cos \psi \sim k_{aq} I_q;$$

$$\underline{E}_{aq} = -jx_{aq} \underline{I}_q;$$

$$\begin{aligned} \underline{E}_f &= \underline{U} + r_a \underline{I} + jx_{\sigma} \underline{I} + jx_{ad} \underline{I}_d + jx_{aq} \underline{I}_q = \\ &= \underline{U} + r_a \underline{I} + jx_{ad} \underline{I}_d + jx_{aq} \underline{I}_q; \end{aligned}$$

x_{ad} , x_{aq} — индуктивные сопротивления взаимной индукции по продольной и поперечной осям; $x_d = x_{ad} + x_{\sigma}$, $x_q = x_{aq} + x_{\sigma}$ — полные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям. Векторная диаграмма рис. 24.64, соответствующая уравнению напряжений, построена для режима генератора с активно-индуктивной нагрузкой.

При построении диаграммы для расчета тока возбуждения при заданном режиме (U , I , $\cos \varphi$) направление оси q определяется по вектору $\underline{OD} = \underline{U} + r_a \underline{I} + jx_{aq} \underline{I}_q + jx_{ad} \underline{I}_d$ (ось q направляется в противоположную сторону по отношению к этому вектору).

Насыщенная явнополюсная синхронная машина. В практике инженерных расчетов ток возбуждения явнополюсной машины при нагрузке приближенно может быть определен с помощью векторной диаграммы насыщенной

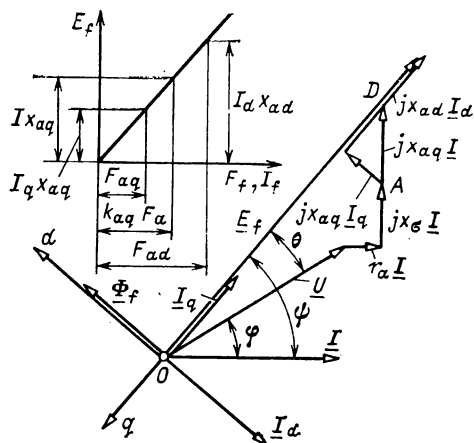


Рис. 24.64

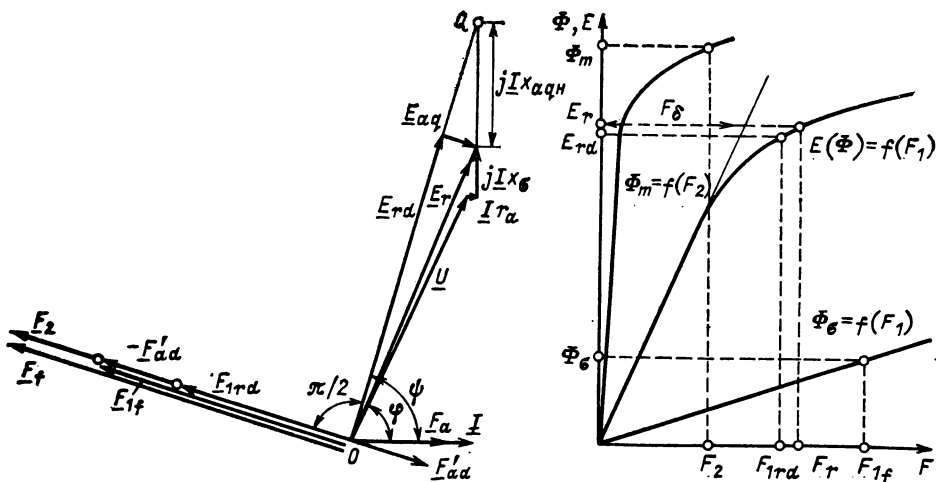


Рис. 24.65

неявнополюсной машины. Разъяснения, необходимые для применения этой диаграммы к явнополюсной машине, были даны выше.

Более точный расчет режима нагрузки насыщенного явнополюсного двигателя с учетом влияния поперечных токов якоря на продольное поле и с учетом изменения потока рассеяния обмотки возбуждения производится следующим образом.

1. Для заданного режима нагрузки ($U, I, \cos \varphi$) строится векторная диаграмма напряжений (рис. 24.65) в соответствии с уравнением

$$\underline{E}_r = \underline{U} + r_a I + j x_{\sigma} I$$

и определяется результирующая ЭДС E_r .

2. По ЭДС E_r находится поток Φ_r , и с помощью переходной характеристики намагничивания $\Phi = f(F_1)$ (см. § 24.26) определяются МДС F_{1r} , F_{σ} (рис. 24.65) и коэффициент насыщения $k_{za} = F_{1r}/F_{\delta}$.

3. По рис. 24.60 определяются коэффициенты κ_d , κ_q , $k_{qd} = f(k_{za}, \delta_{\max}/\delta')$, где $\delta' = \delta k_{\delta}$. Определяются насыщенные значения параметров x_{adn} , x_{aqn} (см. § 24.24).

4. Определяется направление оси q (угол ψ) с помощью построения комплекса OQ , исходя из уравнения

$$\overline{OQ} = \underline{E}_r + j x_{aqn} I,$$

и ЭДС E_r раскладывается на продольную (E_{rd}) и поперечную (E_{raq}) составляющие (рис. 24.65).

5. По результирующему потоку по продольной оси Φ_{rd} , соответствующему ЭДС E_{rd} , и переходной характеристике намагничивания определяется МДС F_{1rd} (рис. 24.65).

6. Определяется МДС F'_{ad} , эквивалентная в отношении влияния продольных (первое слагаемое) и поперечных (второе слагаемое) токов якоря на продольное поле машины:

$$F'_{ad} = \kappa_d k_{ad} F_d + k_{qd} (\tau/\delta') F_q,$$

где F_d , F_q — см. § 24.20; k_{ad} — см. рис. 24.54 (без учета насыщения); k_{qd} — см. выше,

7. По диаграмме МДС (рис. 24.65) определяется МДС

$$F_{1f} = F_{1rd} - F'_{ad},$$

с помощью которой по характеристике $\Phi_{f\sigma} = f(F_1)$ определяется поток рассеяния полюсов $\Phi_{f\sigma}$.

8. Рассчитывается поток в полюсе $\Phi_m = \Phi_{rd} + \Phi_{f\sigma}$, с помощью которого по характеристике $\Phi_m = f(F_2)$ определяется магнитное напряжение ротора F_2 .

9. Определяется МДС обмотки возбуждения (рис. 24.65)

$$F_f = F_{1rd} - F'_{ad} + F_2$$

или, учитывая, что все МДС направлены по продольной оси,

$$F_f = F_{1rd} + F'_{ad} + F_2.$$

Построение векторных диаграмм для режима двигателя производится так же, как и для режима генератора, но активная составляющая тока по отношению к напряжению машины $\underline{U}$ берется отрицательной:

$$I \cos \varphi < 0; P = mUI \cos \varphi < 0.$$

На диаграмме может быть показано напряжение сети $\underline{U}_c$, параллельно с которой работает двигатель $\underline{U}_c = -\underline{U}$.

Примечание. При построении векторных диаграмм удобнее пользоваться относительными единицами (см. § 24.23).

24.28. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ НА АВТОНОМНУЮ НАГРУЗКУ. ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Характеристики

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения на выводах обмотки статора (якоря) от тока статора [$U = f(I)$]

хронные машины должны выдерживать ударный ток при напряжении холостого хода, равном 105 %:

$$i_{уд} = \frac{1,05 \cdot 1,8}{x''_{*d}},$$

где x''_{*d} — см. § 24.31.

Несимметричные короткие замыкания на выводах машины

Установившееся значение тока короткого замыкания зависит от вида короткого замыкания на выводах машины:

однофазное короткое замыкание (рис. 24.70, а; $\underline{U}_A=0$; $\underline{I}_B=\underline{I}_C=0$)

$$I_{K1} = \frac{3E}{x_1 + x_2 + x_0};$$

двухфазное короткое замыкание (рис. 24.70, б; $\underline{U}_B=\underline{U}_C$; $\underline{I}_A=0$; $\underline{I}_B+\underline{I}_C=0$)

$$I_{K2} = \frac{\sqrt{3}E}{x_1 + x_2};$$

двухфазное короткое замыкание на нейтраль (рис. 24.70, в; $\underline{I}_A=0$; $\underline{U}_B=\underline{U}_C=0$)

$$I_{K20} = \frac{\sqrt{3(x_2^2 + x_2x_0 + x_0^2)E}}{x_1x_2 + x_1x_0 + x_2x_0},$$

где $E=E_f=f(I_f)$ определяется по спрямленной характеристике холостого хода; $x_1=x_d$ — индуктивное сопротивление прямой последо-

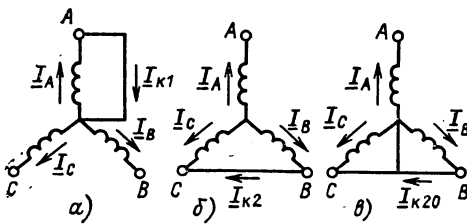


Рис. 24.70. Схемы короткого замыкания синхронного генератора:

а — однофазное короткое замыкание; б — двухфазное; в — двухфазное на нейтраль

вательности; x_2, x_0 — индуктивные сопротивления обратной и нулевой последовательностей.

При вычислении начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания принимают $\underline{E}=\underline{E}''$; $x_1=x'_d$.

ЭДС $\underline{E}''$ зависит от режима, предшествовавшего короткому замыканию (рис. 24.71):

$$\underline{E}'' = \underline{U} + jx''_d \underline{I}_d + jx''_q \underline{I}_q.$$

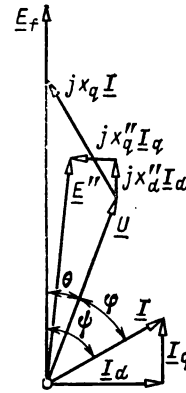


Рис. 24.71

24.29. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ МАШИН

Способы включения синхронных машин на параллельную работу (способы синхронизации)

а) Точная синхронизация двух синхронных генераторов Γ_1 и Γ_2 (рис. 24.72, а) или синхронного генератора с сетью при включении на параллельную работу заключается в

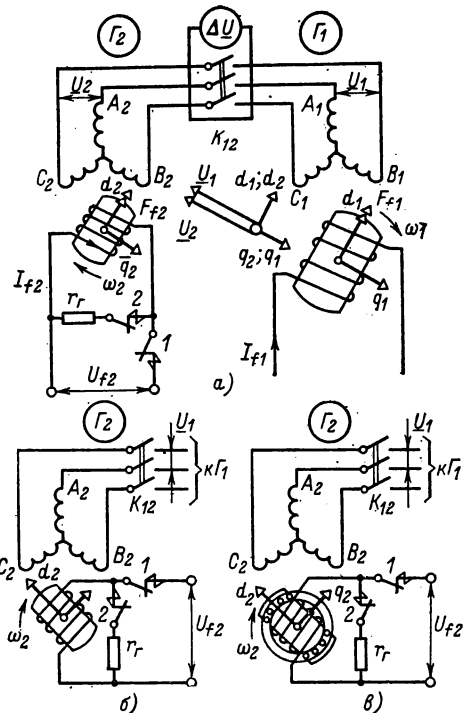


Рис. 24.72. Способы синхронизации синхронных машин:

K_{12} — выключатель для включения генераторов на параллельную работу; 1 и 2 — контакты АГП; r_{Γ} — резистор гашения поля

выполнении следующих требований:

I. Частоты генераторов (генератора и сети) равны:

$$f_1 = f_2.$$

II. Напряжения генераторов (генератора и сети) равны по амплитуде и фазе:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \text{ или } \Delta \underline{U} = 0.$$

III. Чередувание фаз генераторов (генератора и сети) одинаково.

Выполнение условий точной синхронизации позволяет осуществить включение генераторов на параллельную работу без возникновения бросков тока и момента. Нарушение условий синхронизации может привести к серьезным повреждениям генератора.

б) *Самосинхронизация* невозбужденного синхронного генератора G_2 , вращающегося с частотой $\omega_2 = \omega_1(1 \pm s)$, с возбужденным генератором G_1 (или сетью) производится одновременным включением выключателя K_{12} и замыканием контактов 1 автомата гашения поля (рис. 24.72, б), соединяющего обмотку возбуждения генератора G_2 с заранее возбужденным до напряжения U_{f2} возбудителем (до этого обмотка возбуждения с помощью контактов 2 АГП была замкнута на резистор гашения поля). В процессе нарастания тока возбуждения I_{f2} на ротор действует вращающий момент турбины, синхронный вращающий момент и асинхронный вращающий момент, возникающий при $s \neq 0$ за счет взаимодействия с вращающимися полем якоря ток, индуцированный в обмотке возбуждения и демпферной обмотке.

При выполнении определенных условий включаемый генератор втягивается в синхронизм:

- I. $|s| \leq 2 \div 3 \%$;
- II. $\frac{df_2}{dt} \leq 0,5 \text{ с}^{-2}$ (при $f_1 = \text{const}$);
- III. $\frac{U_{f2}}{r_{f2}} = I_{f2} \approx I_{fx}$.

Самосинхронизация требует значительно меньше времени, чем точная синхронизация, но сопровождается появлением переходных токов [24.23], в несколько раз превышающих номинальный ток генератора G_2 . Обычно самосинхронизация применяется, когда бросок тока не превышает $3,5 I_{ном}$.

в) *Асинхронный пуск* синхронного двигателя (или компенсатора G_2) производится в том случае, если имеется демпферная (или пусковая) короткозамкнутая обмотка на роторе. Асинхронный пуск осуществляется в две ступени (рис. 24.72, в):

1. Обмотка статора G_2 включается выключателем K_{12} на напряжение U_1 генератора G_1 (сети). Обмотка возбуждения G_2 предварительно замыкается на резистор с сопротивлением $r_r \approx (5 \div 10) r_{f2}$, где r_{f2} — сопротивление обмотки возбуждения. В качестве резистора обычно используется гасительный резистор (рис. 24.72, в).

Вращающееся магнитное поле индуцирует в демпферной обмотке и в обмотке возбуж-

дения тока, взаимодействие которых с полем якоря создает электромагнитный момент. Если этот момент превосходит момент сопротивления, ротор приходит во вращение.

II. При частоте вращения ротора $\omega_2 = \omega_1(1 - s_0)$, близкой к синхронной ($s_0 \approx 0,05$), контакты 1 автомата гашения поля замыкаются, а контакты 2 размыкаются (рис. 24.72, в). Обмотка возбуждения присоединяется к заранее возбужденному до напряжения U_{f2} возбудителю, и ротор втягивается в синхронизм так же, как описано в п. «б».

Пусковые свойства синхронного двигателя или компенсатора характеризуются начальным пусковым моментом M_n , начальным пусковым током I_n , входным вращающим моментом $M_{вх}$, определяемым при скольжении s_0 , и характером изменения пускового момента в процессе пуска.

При тяжелых условиях пуска для уменьшения пусковых токов снижают напряжение на обмотке статора машины при помощи реакторов или автотрансформаторов.

Расчет пусковых токов и пусковых вращающих моментов — см. [24.21].

Работа синхронной машины параллельно с мощной электрической сетью

а) Активная мощность *явнополюсной* синхронной машины (при допущении $r_a \ll x_d$)

$$P \approx P_{ам} = mU \left[\frac{E_f}{x_d} \sin \theta + \frac{U}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \right],$$

где θ — электрический угол между ЭДС E_f и напряжением машины U (см. рис. 24.64); $\theta > 0$, если U отстает от E_f ; $\bar{P} > 0$, если мощность отдается в сеть.

Реактивная мощность *явнополюсной* синхронной машины

$$Q = mU \left[\frac{E_f \cos \theta}{x_d} - \frac{U}{x_d} - U \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin^2 \theta \right].$$

$Q > 0$ при отстающей от U реактивной составляющей тока (при размагничивающей реакции якоря).

Приведенные выше формулы выводятся из анализа векторной диаграммы ненасыщенной явнополюсной машины (см. рис. 24.64).

Зависимости P , $Q = f(\theta)$ при $U = \text{const}$ и $E_f = \text{const}$ ($I_f = \text{const}$) называются *уголовыми характеристиками синхронной машины*.

Примечания: 1. Режим работы рассматриваемой машины практически не влияет на напряжение U и частоту f мощной сети.

2. Во все формулы § 24.29 следует подставлять ненасыщенные значения E_f , x_d , x_q и x_a , определенные по спрямленной характеристике холостого хода (см. рис. 24.62, 24.64).

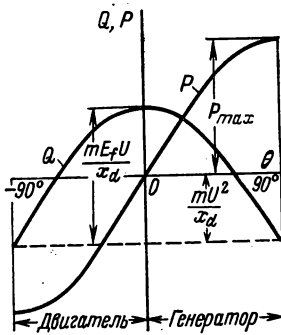


Рис. 24.73. Угловые характеристики неявнополюсной машины

а) Активная и реактивная мощности неявнополюсной машины ($x_d = x_q$):

$$P \approx P_{\text{эм}} = \frac{mUE_f}{x_d} \sin \theta;$$

$$Q = mU \left(\frac{E_f}{x_d} \cos \theta - \frac{U}{x_d} \right).$$

На рис. 24.73 показаны угловые характеристики неявнополюсной машины.

в) Максимальная активная мощность (предел статической устойчивости)

$$P_{\text{max}} \approx \frac{mUE_f}{x_d}.$$

г) Вращающий момент синхронной машины

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega} = \frac{mU}{\Omega} \left[\frac{E_f}{x_d} \sin \theta + \frac{U}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \right].$$

д) Максимальный вращающий момент (предельный по статической устойчивости)

$$M_{\text{max}} \approx \frac{mUE_f}{\Omega x_d}.$$

е) Статическая перегружаемость синхронного генератора — отношение максимальной активной мощности, которую генератор может развить при номинальном возбуждении и напряжении, к номинальной активной мощности:

$$\frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{ном}}} \approx \frac{E_* I_{\text{ном}}}{x_{*d} \cos \varphi_{\text{ном}}} \approx \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}.$$

Требования к статической перегружаемости устанавливаются стандартами на синхронные машины (см. § 24.16).

Примечание. Для синхронного двигателя вводится аналогичное понятие крайности максимального момента, определяемой приближенно по такой же формуле (см. § 23.8, п. 31).

ж) Активная и реактивная мощности невозбужденной явнополюсной (реактивной) синхронной машины ($I_f = E_f = 0$):

$$P \approx \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta;$$

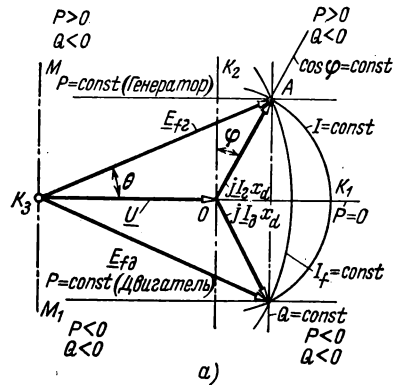


Рис. 24.74. а — векторная диаграмма синхронной машины, работающей в электрической системе; б — U-образные характеристики синхронной машины

$$Q \approx - \frac{mU^2}{x_d} \left(1 + \frac{x_d - x_q}{x_q} \sin^2 \theta \right).$$

з) Режимы работы и характеристики синхронной машины, работающей параллельно с мощной электрической сетью при $U_c = \text{const}$, могут быть проанализированы с помощью векторной диаграммы, изображенной на рис. 24.74, а (для упрощения пояснений рассматривается ненасыщенная неявнополюсная машина). Конкретный режим работы характеризуется положением конца вектора E_f на диаграмме (точка А):

А выше линии $K_3 K_1$ — генераторный режим;

А ниже линии $K_3 K_1$ — двигательный режим;

А — на линии $K_3 K_1$ — режим синхронного компенсатора.

При перемещении точки А по линиям $P = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$, $I = \text{const}$, $I_f = \text{const}$, $Q = \text{const}$ могут быть построены соответствующие эксплуатационные характеристики синхронной машины. Линия MM_1 ограничивает область устойчивых режимов работы синхронной машины ($-90^\circ < \theta < 90^\circ$).

Зависимость $I = f(I_f)$ при $U = \text{const}$, $P = \text{const}$ называется U-образной характеристикой синхронной машины (рис. 24.74, б).

Качания синхронных машин

а) Период свободных малых колебаний ротора машины относительно синхронно вращающегося поля при параллельной работе с электрической системой

$$T_{\text{св}} \approx 2\pi \sqrt{\frac{J \Omega}{p c p}},$$

где J — момент инерции вращающихся частей агрегата, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; Ω — угловая скорость ротора; $p_c = dP/d\theta$ — удельная синхронизирующая мощность при заданных токе возбуждения, напряжении и активной мощности:

$$p_c = \frac{mE_f U}{x_d} \cos \theta = \frac{1}{x_d} \sqrt{(mE_f U)^2 - (P x_d)^2};$$

$$\theta = \arcsin \left(\frac{P x_d}{mE_f U} \right).$$

б) При сопряжении синхронного двигателя непосредственно с поршневым компрессором или генератора с двигателем внутреннего сгорания на вал машины действует внешний вращающий момент, содержащий постоянную и переменную составляющие. Последнюю можно разложить в гармонический ряд

$$\Sigma M_v \sin(\Omega_{Mv} t + \Phi_{Mv}),$$

где M_v , Ω_{Mv} , Φ_{Mv} — амплитуда, угловая частота и фаза v -й гармонической внешнего момента.

При работе машины параллельно с сетью амплитуда колебаний угла нагрузки увеличивается по сравнению с той же амплитудой в режиме работы генератора на автономную нагрузку.

Отношение амплитуды v -й гармонической колебаний угла нагрузки при параллельной работе с сетью к той же амплитуде при работе генератора на автономную нагрузку называется модулем резонанса v -й гармонической ξ_v . Модуль резонанса зависит от соотношения между периодом собственных колебаний T_{ov} и периодом колебаний данной гармонической момента на валу T_{Mv} :

$$\xi_v = \frac{1}{1 - \left(\frac{T_{Mv}}{T_{sv}} \right)^2}, \text{ где } T_{Mv} = \frac{2\pi}{\Omega_{Mv}}.$$

Неравномерность частоты вращения при работе генератора на автономную нагрузку характеризуется коэффициентом неравномерности частоты вращения

$$\xi = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}{\Omega} = \frac{2\pi P}{J \Omega^3},$$

где ρ — коэффициент, характеризующий неравномерность внешнего момента (табл. 24.18); P — мощность машины.

Таблица 24.18. Значения ρ и μ_1 для дизелей

Число цилиндров	Двухтактный		Четырехтактный	
	ρ	μ_1	ρ	μ_1
1	1,3	1	—	—
2	0,4	2	1,4	1,0
3	0,19	3	0,45	1,5
4	0,11	4	0,20	2,0
5	0,075	5	0,14	2,5
6	0,055	6	0,10	3,0

Примечание. Для поршневых компрессоров приближенно значения ρ и μ_1 такие же, как и для двухтактного дизеля.

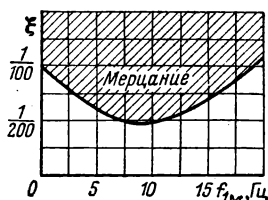


Рис. 24.75. Зависимость допустимых значений коэффициента неравномерности частоты вращения ξ от частоты основной гармонической переменного момента $f_{1M} = \mu_1 \Omega / 2\pi$

Неравномерность частоты вращения не должна превосходить допустимого значения, которое зависит от частоты колебаний скорости, т. е. от частоты основной гармонической внешнего момента (рис. 24.75),

$$f_{1M} = \frac{1}{T_{1M}} = \frac{\mu_1 \Omega}{2\pi},$$

зависящей в свою очередь от типа сопряженной машины (табл. 24.18).

Момент инерции J вращающихся частей генератора, работающего на автономную осветительную нагрузку, выбирается таким образом, чтобы мерцание света не было заметно для глаза (рис. 24.75).

24.30. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Основное преимущество синхронных двигателей по сравнению с асинхронными заключается в том, что они могут работать с $\cos \varphi = 1$, т. е. без потребления реактивной мощности. При перевозбуждении синхронные двигатели отдают реактивную мощность в сеть, вследствие чего улучшается работа сети.

Трехфазные синхронные двигатели выпускаются на мощность от 20 кВт до нескольких десятков тысяч киловатт. При частотах вращения от 100 до 1000 об/мин двигатели имеют обычно явнополюсное исполнение ротора, при больших частотах вращения (1500 и 3000 об/мин) — неявнополюсное.

В зависимости от мощности двигатели выполняются на напряжения от 220 до 10 000 В.

Конструкция двигателей не отличается от конструкции генераторов соответствующего исполнения. Частота вращения двигателя определяется частотой сети $\Omega = 2\pi f/p$ и не зависит от нагрузки на валу двигателя.

Перегрузочная способность двигателя определяется по § 24.29.

При постоянной нагрузке и регулировании тока возбуждения ток, потребляемый двигателем из сети, изменяется по U-образной характеристике (см. § 24.29).

Вращающий момент, активная и реактивная мощности двигателя определяются по тем же уравнениям, что и для генератора (см. § 24.29). На рис. 24.76 изображены рабочие характеристики двигателя при постоянном токе возбуждения, выбранном таким образом, чтобы при холостом ходе двигатель имел коэффициент мощности, равный единице. С ростом нагрузки коэффициент мощности падает. Если ток возбуждения будет выбран так, чтобы двигатель имел номинальный коэффициент

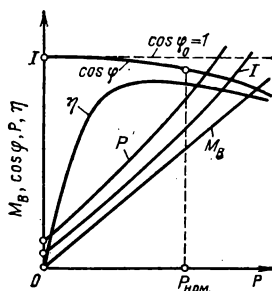


Рис. 24.76. Рабочие характеристики синхронного двигателя

мощности ($\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$) при номинальной нагрузке и опережающем токе, то при снижении нагрузки двигатель будет отдавать в сеть еще большую реактивную мощность, чем при номинальной нагрузке ($\cos \varphi < \cos \varphi_{\text{ном}}$).

При автоматическом регулировании напряжения в функции тока якоря могут быть получены любые заданные характеристики реактивной мощности или коэффициента мощности.

Благодаря своим ценным свойствам, высокому КПД и возможности работы с опережающим током синхронные двигатели широко применяются во многих электроприводах, например для привода крупных вентиляторов, компрессоров, насосов, генераторов постоянного тока, когда не требуется регулирования частоты вращения.

В большинстве случаев применяется асинхронный пуск синхронных двигателей. Асинхронный пуск в ход (см. § 24.29) осуществляется с помощью короткозамкнутой демпферной (пусковой) обмотки, расположенной в пазах полюсных наконечников.

В неявнополюсных двигателях с массивным сердечником ротора и в явнополюсных двигателях с массивными полюсами асинхронный момент при пуске возникает за счет взаимодействия вихревых токов в массивных частях с вращающимся магнитным полем.

Основные требования к синхронным двигателям формулируются в § 24.16.

Особой разновидностью синхронных двигателей являются асинхронизированные синхронные двигатели, напоминающие по своему устройству асинхронные двигатели с фазным ротором. От последних они отличаются тем, что имеют больший воздушный зазор и увеличенное сечение вторичной трехфазной обмотки.

При пуске обмотка ротора двигателя замыкается на пусковой реостат. Затем обмотка ротора присоединяется к возбудителю (или выпрямительному устройству), возбуждается постоянным током, и ротор втягивается в синхронизм.

Таким образом, двигатель обладает пусковыми характеристиками асинхронного двигателя с фазным ротором и рабочими свойствами синхронного двигателя.

Пусковые характеристики асинхронизированных синхронных двигателей получаются примерно такими же, как у асинхронного двигателя с фазным ротором соответствующей мощности.

Область их применения — установки с постоянной частотой вращения и тяжелыми пусковыми условиями, требующие высокого коэффициента мощности (большие компрессоры, насосы и т. д.).

24.31. ПАРАМЕТРЫ И ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ ОБМОТОК СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Формулы для расчета активных и некоторых индуктивных параметров приведены в § 24.24, 24.25. Ниже даются формулы, по которым могут быть приближенно определены постоянные времени в секундах и индуктивные сопротивления синхронной машины, имеющей на роторе кроме обмотки возбуждения еще по одному эквивалентному демпферному контуру по продольной и поперечной осям ротора.

Формулы составлены без учета насыщения и вытеснения тока в обмотках.

Параметры эквивалентных демпферных контуров для явнополюсных машин без демпферной обмотки на роторе, явнополюсных машин с массивными полюсами и неявнополюсных машин, в которых нельзя не считать с вихревыми токами в сердечнике ротора, могут быть оценены по [24.7, 24.24].

Если в цепи якоря имеется дополнительное индуктивное или активное сопротивление, оно должно быть добавлено соответственно к индуктивному сопротивлению рассеяния якоря или активному сопротивлению якоря. Так же следует поступать с дополнительными сопротивлениями в цепи обмотки возбуждения. Индуктивные и активные сопротивления, необходимые при определении постоянных времени, могут быть получены как расчетным, так и экспериментальным путем.

1. Постоянные времени и индуктивные сопротивления обмоток синхронной машины при разомкнутых других обмотках. а) Индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси при разомкнутых обмотках (контурах) ротора или в синхронном установившемся режиме (рис. 24.77)

$$x_d = x_\sigma + x_{ad}.$$

б) Индуктивное сопротивление обмотки по поперечной оси при разомкнутых обмотках (контурах) ротора или в синхронном установившемся режиме (рис. 24.78)

$$x_q = x_\sigma + x_{aq}.$$

в) Индуктивное сопротивление и постоянная времени обмотки возбуждения при разом-

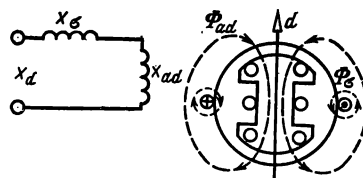


Рис. 24.77

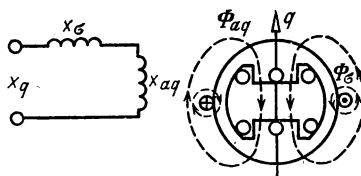


Рис. 24.78

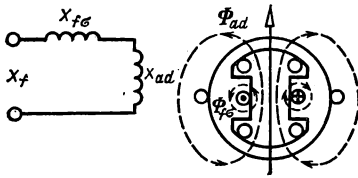


Рис. 24.79

кнутых других обмотках или контурах (рис. 24.79)

$$x_f = x_{f\sigma} + x_{ad}; \quad T_f = x_f / \omega r_f.$$

г) Индуктивное сопротивление и постоянная времени демпферной обмотки по продольной оси при разомкнутых других обмотках

$$x_{kd} = x_{k\sigma d} + x_{ad}; \quad T_{kd} = x_{kd} / \omega r_{kd}.$$

д) Индуктивное сопротивление и постоянная времени демпферной обмотки по поперечной оси при разомкнутых других обмотках

$$x_{kq} = x_{k\sigma q} + x_{aq}; \quad T_{kq} = x_{kq} / \omega r_{kq}.$$

2. Постоянные времени и индуктивные сопротивления обмоток ротора синхронной машины при короткозамкнутой обмотке якоря и разомкнутых других обмотках (контурах). а) Индуктивное сопротивление и постоянная времени обмотки возбуждения при короткозамкнутой обмотке якоря и разомкнутых контурах демпферной обмотки (рис. 24.80)

$$x'_f = x_{f\sigma} + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma}} \right)^{-1}; \quad T'_f = \frac{x'_f}{\omega r_f}.$$

б) Индуктивное сопротивление и постоянная времени демпферной обмотки по про-

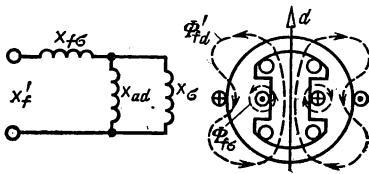


Рис. 24.80

дольной оси при короткозамкнутой обмотке якоря и разомкнутой обмотке возбуждения

$$x'_{kd} = x_{k\sigma d} + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma}} \right)^{-1};$$

$$T'_{kd} = x'_{kd} / \omega r_{kd}.$$

в) Индуктивное сопротивление взаимной индукции между контурами ротора по продольной оси при короткозамкнутой обмотке якоря

$$x'_{fkd} = \left(\frac{1}{x_{\sigma}} + \frac{1}{x_{ad}} \right)^{-1}.$$

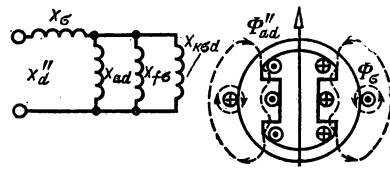


Рис. 24.81

г) Индуктивное сопротивление и постоянная времени демпферной обмотки по поперечной оси при короткозамкнутой обмотке якоря

$$x'_{kq} = x_{k\sigma q} + \left(\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{\sigma}} \right)^{-1};$$

$$T'_{kq} = x'_{kq} / \omega r_{kq}.$$

3. Параметры и постоянные времени, характеризующие переходные процессы в синхронной машине с демпферными контурами на роторе. а) Постоянная времени затухания продольных сверхпереходных составляющих токов (картина поля и схема замещения для сверхпереходных составляющих токов по продольной оси представлены на рис. 24.81)

$$T_d'' = \frac{2\sigma'_{fkd} T'_f T'_{kd}}{(1+q)(T'_f + T'_{kd})},$$

$$\text{где } \sigma'_{fkd} = 1 - \frac{(x'_{fkd})^2}{x'_f x'_{kd}}$$

— коэффициент рассеяния между контурами ротора;

$$q = \sqrt{1 - \frac{4\sigma'_{fkd} T'_f T'_{kd}}{(T'_f + T'_{kd})^2}} \approx 0,78 \div 1$$

(меньшее значение — при замыкании обмотки якоря накоротко, большее — при разомкнутой обмотке якоря).

Приближенно можно считать $q=1$ во всех случаях, погрешность в T_d'' не превысит при этом 10 %.

$$\text{При } T'_f \gg T'_{kd} \text{ и } q \approx 1 \quad T_d'' \approx \sigma'_{fkd} T'_{kd}.$$

б) Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси, определяющее начальное значение тока якоря при переходном процессе,

$$x''_d = x_{\sigma} + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{f\sigma}} + \frac{1}{x_{k\sigma d}} \right)^{-1}.$$

Для неявнополюсных машин, при $2p=2$ можно воспользоваться эмпирической формулой

$$x''_{*d} \approx x_{*\sigma} + 0,025.$$

в) Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси и постоянная времени затухания поперечных сверхпереходных токов (картина поля и схема замещения для сверхпереходных состав-

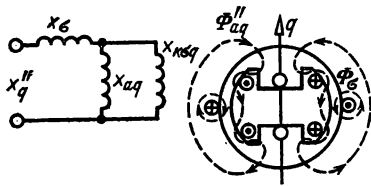


Рис. 24.82

ляющих токов по поперечной оси представлены на рис. 24.82)

$$x''_q = x_\sigma + \left(\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{\kappa sq}} \right)^{-1}; \quad T''_q = T'_{\kappa q}.$$

г) Постоянная времени затухания переходных составляющих продольных токов

$$T'_d = \frac{1}{2} (1 + q) (T'_f + T'_{\kappa d}) \approx T'_f + T'_{\kappa d},$$

где q определяется по п. «а».

При $T'_f \gg T'_{\kappa d}$ и $q \approx 1$ $T'_d \approx T'_f$.

д) Переходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси, определяющее начальное значение переходной составляющей продольного тока якоря

$$x'_d \approx x_d \frac{T'_f + T'_{\kappa d}}{T_f + T_{\kappa d}} = x_d \frac{T'_d}{T_{d0}},$$

где $T'_{d0} = T_f + T_{\kappa d}$ — постоянная времени затухания переходных составляющих токов ротора при разомкнутой обмотке якоря.

Примечание. Выражение для x'_d получено при $q \approx 1$ (см. п. «а»). Погрешность в x'_d не превышает 10 %.

При $T_f \gg T_{\kappa d}$ и $T'_f \gg T'_{\kappa d}$

$$x'_d = x_\sigma + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{f\sigma}} \right)^{-1}.$$

е) Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока якоря

$$T_a = x_2 / \omega r_a,$$

где x_2 — см. ниже; r_a — без учета добавочных потерь.

4. Параметры несимметричных режимов работы синхронной машины. а) Индуктивное сопротивление для токов нулевой последовательности x_0 — см. § 24.24.

б) Индуктивное сопротивление для токов обратной последовательности

$$x_2 \approx \frac{x''_d + x''_q}{2} \text{ при } x''_d \approx x''_q;$$

$$x_2 \approx \sqrt{x''_q x''_d} \text{ при } x''_d \ll x''_q.$$

5. Механическая постоянная времени или постоянная инерции вращающихся частей синхронной машины. Время, с, в течение которого ротор машины под действием момента равного моменту при номинальной полной мощности

при $\cos \varphi = 1$, разгоняется из неподвижного состояния до номинальной частоты вращения

$$T_J = J \frac{\Omega_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}},$$

где J — момент инерции вращающихся частей, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $\Omega_{\text{ном}} = 2\pi n_{\text{ном}} / 60$ — номинальная угловая скорость, рад/с .

24.32. ПОТЕРИ И КПД СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Классификация потерь приведена в § 23.12.

Явнополюсные синхронные машины.

а) Магнитные потери в зубцах и ярме статора (основные) определяются по § 24.9 при индукциях B_{z1} и B_{a1} , соответствующих потоку Φ при холостом ходе и номинальном напряжении (см. § 24.26).

При толщине листов 0,5 мм для стали 1512 удельные потери $p_{1,0/50} = 1,5$ Вт/кг; для стали 1513 $p_{1,0/50} = 1,4$ Вт/кг; для стали 3413 вдоль прокатки $p_{1,0/50} = 1,05$ Вт/кг, поперек прокатки $p_{1,0/50} = 1,4$ Вт/кг.

б) Механические потери (с учетом потерь на вентиляцию при $f = 50$ Гц);

для машин с горизонтальным валом

$$P_T = 0,9 \cdot 10^5 p \tau^3 \sqrt{l_\delta};$$

для машин с вертикальным валом

$$P_T \approx 0,6 \cdot 10^5 p \tau^3 \sqrt{l_\delta},$$

в) Электрические потери в обмотке статора определяются по § 24.9 при номинальном токе.

г) Электрические потери в обмотке возбуждения определяются при номинальном токе возбуждения $I_{f\text{ном}}$ и расчетной рабочей температуре (см. § 23.8, п. 22).

Для машин с косвенной системой возбуждения

$$P_f = r_f I_{f\text{ном}}^2 + \Delta U_{\text{щ}} I_{f\text{ном}}.$$

Для машин с прямой системой возбуждения

$$P_f = \frac{r_f I_{f\text{ном}}^2 + \Delta U_{\text{щ}} I_{f\text{ном}}}{\eta_f},$$

где $\Delta U_{\text{щ}} \approx 2$ В; $\eta_f = 0,75 \div 0,85$ — КПД возбудителя.

д) Добавочные потери на поверхности полюсов при холостом ходе

$$P_{\text{м.д}} = 2p \alpha t_\delta k_0 (Z_1 \Omega)^{1,5} (B_{\delta z1})^2,$$

где $B_0 = B_\delta (k_{\delta 1} - 1)$; B_δ — индукция в зазоре при холостом ходе и $E_f = U_{\text{ном}}$; $k_0 = 685$ — массивные полюсные наконечники; $k_0 = 253$ — полюс из листов 2 мм; $k_0 = 136$ — полюс из листов 1 мм; $\alpha = b_p / t_\delta$.

е) Добавочные нагрузочные потери: $P_d \approx 0,005 S_{\text{ном}}$ в машинах до 100 кВ·А; $P_d \approx 0,0025 S_{\text{ном}}$ в машинах более 100 кВ·А, где $S_{\text{ном}} = m_1 U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}$.

ж) Полные потери в машине

$$\Sigma P = P_m + P_{\text{э1}} + P_f + P_T + P_{\text{м,д}} + P_{\text{д}}.$$

з) Коэффициент полезного действия: для генератора

$$\eta_{\text{ном}} = 1 - \frac{\Sigma P}{S_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} + \Sigma P};$$

для двигателя

$$\eta_{\text{ном}} = 1 - \frac{\Sigma P}{S_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_{\text{ном}} + \Sigma P},$$

где $P_{\text{ном}} = P_{\text{вал(ном)}}$ — номинальная мощность двигателя.

Неявнополюсные машины с массивным ротором (типа турбогенераторов):

а) Магнитные потери P_m рассчитываются так же, как и для явнополюсной машины, причем $k_{\text{дз}} = 1,4$; $k_{\text{да}} = 1,3$.

б) Электрические потери в обмотке статора $P_{\text{э1}}$ и обмотке возбуждения P_f определяются так же, как и выше для явнополюсных машин.

в) Добавочные потери в номинальном режиме работы машины $P_{\text{д}}$, зависящие только от тока статора (добавочные потери при коротком замыкании), определяются следующим образом.

Добавочные потери на поверхности ротора от высших гармонических МДС статора

$$P_{\text{д2п}} = \varphi(\beta) \left(\frac{A}{k_{\delta} \delta} \right)^2 D^5 \frac{l_2}{\rho^4} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \cdot 10^{-9},$$

где $\varphi(\beta)$ — см. рис. 24.83; β — сокращение шага обмотки якоря.

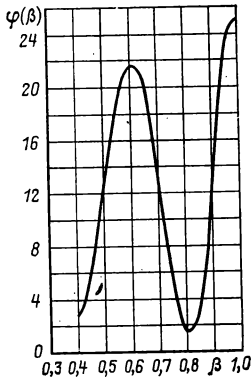


Рис. 24.83

Добавочные потери на поверхности ротора от зубцовых гармонических поля статора

$$P_{\text{д2з}} = \varphi \left(\frac{\delta k_{\delta}}{t_{z1}} \right) \frac{A^2 D^3 l_2}{\rho^{1,5} \sqrt{Z_1}} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \cdot 10^{-5},$$

где t_{z1} — зубцовое деление статора;

$\varphi(\delta k_{\delta}/t_{z1})$ — см. рис. 24.84.

Добавочные потери в сердечнике статора от высших гармонических МДС ротора

$$P_{\text{д1п}} = \varphi(\gamma) [1,5 B_{z1}^2 G_{z1} + 1,7 B_{a1}^2 G_{a1}] b \left(\frac{f}{50} \right)^2 \left(\frac{1}{\text{ОКЗ}} \right)^2,$$

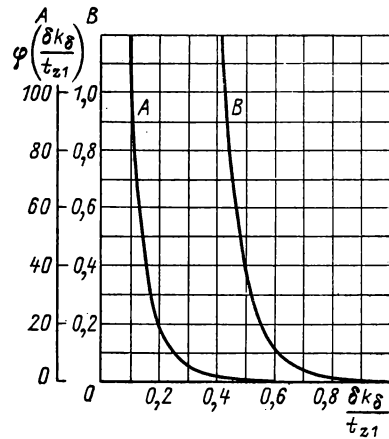


Рис. 24.84

где $b = 0,45$ для стали 1512, 1513 толщиной 0,5 мм; $b = 0,68$ для стали 3411, 3412 толщиной 0,5 мм; $\varphi(\gamma) \approx 0,764 \div 0,852\gamma$; ОКЗ — см. § 24.28.

Добавочные потери на поверхности статора от высших гармонических, связанных с зубчатостью ротора,

$$P_{\text{д1з}} = 5 \left(\frac{p}{Z_2} \right)^{2,5} \left(\frac{F_{af}}{k_{\delta} \delta} \right)^2 \times \\ \times \frac{D^3 l_{m1} k_c}{\rho^2} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} k_{\text{тв}}^2 \cdot 10^{-5},$$

где $k_{\text{тв}}^2 = f \left(\frac{2\pi k_{\delta} \delta}{t_{z1}} \right)$ — см. рис. 24.85;

F_{af} — см. § 24.20; l_{m1} — длина стали сердечника статора.

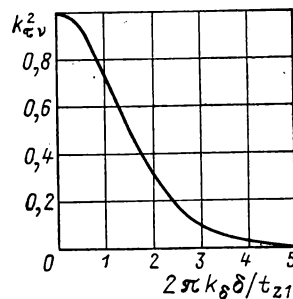


Рис. 24.85

Добавочные пульсационные потери в зубах статора от высших гармонических, связанных с зубчатостью ротора,

$$P_{\text{д2з}} = 7,5b \left(\frac{F_{af}}{k_{\delta} \delta} \right)^2 k_{\text{тв}}^2 G_{z1} \left(\frac{f}{50} \right)^2 \cdot 10^{-12},$$

где $k_{\text{тв}}^2$, b — см. выше.

Добавочные потери в обмотке статора

$$P_{\text{д,э}} = (1 - k_r) P_{\text{э1}},$$

где k_r рассчитывается по § 23.28.

Таблица 24.19. Ориентировочные значения механических и добавочных потерь машин типа турбогенераторов ($n=3000$ об/мин)

$P_{\text{ном}}, \text{МВт}$	2	5	10	25	50	100
$P_{\text{д}}, \%$	0,5	0,45	0,40	0,35	0,25	0,20
$P_{\text{м, д}}, \%$	0,40	0,35	0,30	0,20	0,15	0,10
$P_{\text{т}}, \%$	1,70	1,50	1,20	1,00	1,20	1,15

Примечание. Потери выражены в процентах активной мощности $P_{\text{ном}}$.

Общие добавочные потери при коротком замыкании (ориентировочно по табл. 24.19)

$$P_{\text{д}} = P_{\text{д2п}} + P_{\text{д2з}} + P_{\text{д1п}} + P_{\text{д1з}} + P_{\text{дзз}} + P_{\text{д,з}}.$$

г) Добавочные потери в номинальном режиме работы $P_{\text{м, д}}$, зависящие только от результирующей ЭДС или напряжения (добавочные потери при холостом ходе), определяются следующим образом.

Добавочные потери в сердечнике статора от высших гармонических МДС ротора (при холостом ходе)

$$P_{\text{м, д1п}} = P_{\text{д1п}} (\text{ОКЗ})^2.$$

Добавочные потери на поверхности статора от гармонических, связанных с зубчатостью ротора (при холостом ходе),

$$P_{\text{м, д1з}} = P_{\text{д1з}} (\text{ОКЗ})^2.$$

Добавочные пульсационные потери в зубцах статора от высших гармонических, связанных с зубчатостью ротора (при холостом ходе),

$$P_{\text{м, д2з}} = P_{\text{д2з}} (\text{ОКЗ})^2.$$

Добавочные потери на поверхности ротора от зубчатости статора (при холостом ходе)

$$P_{\text{м, д2з}} = \frac{5,1 D^3 l_2}{\rho^{1,5} \sqrt{Z_1}} [B_8 (k_{\delta 1} - 1)]^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \cdot 10^7.$$

Общие добавочные потери при холостом ходе (ориентировочно по табл. 24.19)

$$P_{\text{м, д}} = P_{\text{м, д1п}} + P_{\text{м, д1з}} + P_{\text{м, д2з}} + P_{\text{м, д2з}}.$$

д) Механические потери ($P_{\text{т}}$).

Потери на трение ротора о воздух

$$P_{\text{т2}} = 0,573 \frac{D_2^4 l_2}{\rho^3} \left(\frac{f}{50} \right)^3 \cdot 10^5.$$

Потери на трение двух бандажных колец о воздух

$$P_{\text{т, к}} = 0,573 \frac{D_{\text{к}}^4 l_{\text{к}}}{\rho^3} \left(\frac{f}{50} \right)^3 \cdot 10^5,$$

где $D_{\text{к}}$ и $l_{\text{к}}$ — диаметр и длина бандажного кольца.

Потери на трение о воздух боковых поверхностей канавок рифления

$$P_{\text{т, р}} = \frac{0,27 n_{\text{р}}}{\rho^3} [D_2^5 - (D_2 - 2h_{\text{р}})^5] \left(\frac{f}{50} \right)^3 \cdot 10^4,$$

$n_{\text{р}}$ — число канавок рифления; $h_{\text{р}}$ — глубина рифления.

Суммарные потери на трение о воздух

$$P_{\text{т, в}} = P_{\text{т2}} + P_{\text{т, к}} + P_{\text{т, р}}.$$

Потери на вентиляцию

$$P_{\text{т, вент}} = 1,1 \vartheta_{\text{вент}} L \cdot 10^3,$$

где $\vartheta_{\text{вент}}$ — нагрев охлаждающего воздуха в вентиляторе, °C ($\vartheta_{\text{вент}} = 5^\circ\text{C}$ до 25 МВт, 7°C при 50 МВт, 10°C при 100 МВт и выше); L — расход охлаждающего воздуха, м³/с:

$$L \approx \frac{P_{\text{м}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{д}} + P_{\text{м, д}} + P_{\text{т2}} + P_{\text{т, к}} + P_{\text{т, р}}}{1100 \vartheta_{\text{возд}}},$$

где $\vartheta_{\text{возд}} = 20 \div 25^\circ\text{C}$ — нагрев воздуха в активных частях машины.

Потери в подшипниках

$$P_{\text{т, п}} = 255 \sqrt{\frac{G_2 l_{\text{в}}}{2\rho^3 d_{\text{в}}}} d_{\text{в}}^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \cdot 10^3,$$

где G_2 — масса ротора, кг; $l_{\text{в}}$ и $d_{\text{в}}$ — длина и диаметр шейки вала.

Общие механические потери (ориентировочно по табл. 24.19)

$$P_{\text{т}} = P_{\text{т, в}} + P_{\text{т, вент}} + P_{\text{т, п}}.$$

В турбогенераторах с водородным охлаждением потери на трение $P_{\text{т, в}}$ и потери на вентиляцию $P_{\text{т, вент}}$ должны быть уменьшены в 8 раз при избыточном давлении водорода 0,005 МПа (при абсолютном давлении 0,105 МПа). При других давлениях водорода это уменьшение обратно пропорционально плотности водорода, т.е. абсолютному давлению. Например, при избыточном давлении 0,1 МПа (при давлении 0,2 МПа) потери должны быть уменьшены в $8 \cdot 1,05/2 \approx 4$ раза.

е) Полные потери и КПД — как для явнотолесных машин.

В. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

24.33. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Устройство машины постоянного тока показано на рис. 24.86. Неподвижная часть машины постоянного тока состоит из стальной станины, к которой болтами крепятся дополнительные и главные полюсы. Станина явля-

ется частью магнитопровода машины. Главные полюсы собираются из неизолированных листов электротехнической или конструкционной стали толщиной 1—2 мм и спрессовываются с помощью нажимных щек и стяжных шпилек. Дополнительные полюсы изготавливаются массивными из конструкционной стали.

На главных полюсах размещаются катушки одной или нескольких обмоток возбуждения, схема соединения каждой из которых

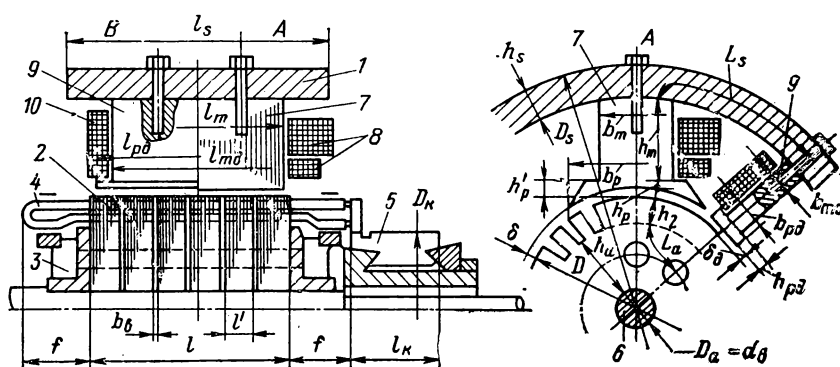


Рис. 24.86. Размеры и устройство машины постоянного тока:

1 — станина; 2 — пакет сердечника якоря; 3 — обмоткодержатель; 4 — обмотка якоря; 5 — коллектор; 6 — вал; 7 — сердечник главного полюса; 8 — обмотки возбуждения; 9 — сердечник дополнительного полюса; 10 — обмотки дополнительного полюса

принципиально не отличается от схемы обмоток возбуждения синхронной явнополюсной машины (см. § 23.24). Катушки дополнительных полюсов соединяются по такой же схеме и включаются последовательно с обмоткой якоря.

Вращающаяся часть машины состоит из якоря и коллектора. Сердечник якоря набирается из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм и прессуется нажимными кольцами, играющими одновременно роль обмоткодержателей. В зависимости от системы вентиляции в сердечнике имеются аксиальные или радиальные каналы.

В пазы сердечника якоря укладывается обмотка, соединяемая с коллекторными пластинами. Коллектор в зависимости от режима работы машины выполняет функцию механического инвертора или выпрямителя. Отвод и подвод электрической энергии к обмотке якоря осуществляются с помощью щеток, которые удерживаются в контакте с коллектором с помощью щеткодержателей.

Принцип действия машины постоянного тока иллюстрируется рис. 24.87. При разомкнутой обмотке якоря ($I_a = 0$) магнитное поле в машине создается только МДС обмотки

возбуждения, по которой протекает постоянный ток I_b . При вращении якоря с частотой n в его обмотке индуцируется переменная ЭДС частотой f , где $f = p\Omega/2\pi$, $\Omega = \pi n/30$.

Переменная ЭДС при помощи коллектора и механических щеток выпрямляется.

При подключении к щеткам активной нагрузки или сети постоянного тока в обмотке якоря появляется ток, значение и направление которого зависят от соотношения между ЭДС и напряжением сети. При работе в генераторном режиме (вращение по стрелке Γ на рис. 24.87) ЭДС больше, чем напряжение сети ($E > U$), ток якоря совпадает по направлению с ЭДС и механическая энергия, подводимая через вал машины, преобразуется в электрическую энергию, поступающую в сеть.

При работе в режиме двигателя (вращение по стрелке D) ЭДС, индуцированная в обмотке якоря, меньше, чем напряжение сети ($E < U$), ток якоря совпадает по направлению с напряжением сети, а электрическая энергия, поступающая из сети, преобразуется в механическую энергию, передаваемую через вал сопряженному с ним механизму.

Когда машина нагружена и работает в режиме двигателя или генератора ($I_a \neq 0$), магнитное поле в ней создается совместным действием МДС обмотки возбуждения и МДС обмотки якоря. Картина магнитного поля машины при нагрузке показана на рис. 24.87, из которого видно, что линия 2-2', проходящая через точки на поверхности якоря, в которых индукция равна нулю (физическая нейтраль), смещается на угол β по отношению к поперечной оси машины 1-1' (геометрическая нейтраль).

24.34. ТИПЫ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Двигатели постоянного тока, несмотря на то, что они значительно дороже асинхронных двигателей, находят широкое применение для привода различных механизмов, так как поз-

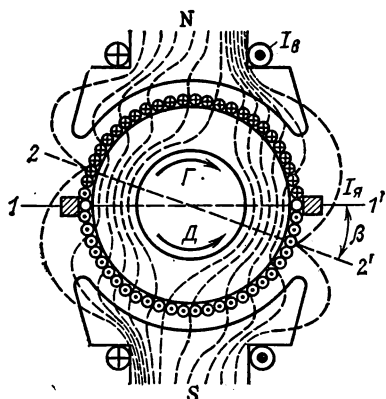


Рис. 24.87

воляют осуществлять плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне и получать специальные механические характеристики.

Двигатели постоянного тока широко используются в электрической тяге [24.28, 24.31], в приводе подъемных устройств, для привода металлорежущих станков. Мощные двигатели постоянного тока применяются для привода прокатных станов и на судах для вращения гребных винтов.

Постоянный ток для питания двигателей получается с помощью генераторов постоянного тока или выпрямительных установок, преобразующих переменный ток в постоянный.

Генераторы постоянного тока являются источником питания для промышленных установок, потребляющих постоянный ток низкого напряжения (электролизные и гальванические установки).

Питание обмоток возбуждения мощных синхронных генераторов осуществляется во многих случаях от генераторов постоянного тока (возбудителей, см. § 24.15).

Широко также распространены генераторы постоянного тока специального исполнения, обладающие особыми свойствами (сварочные, генераторы для освещения поездов, ЭМУ и пр.).

В зависимости от схемы питания обмотки возбуждения машины постоянного тока разделяются на несколько типов.

На рис. 24.88 приведены схемы соединения обмоток и характеристики машин постоянного тока с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением (на рисунке не показаны пусковые и регулировочные реостаты в цепи обмотки возбуждения — см. разд. 50).

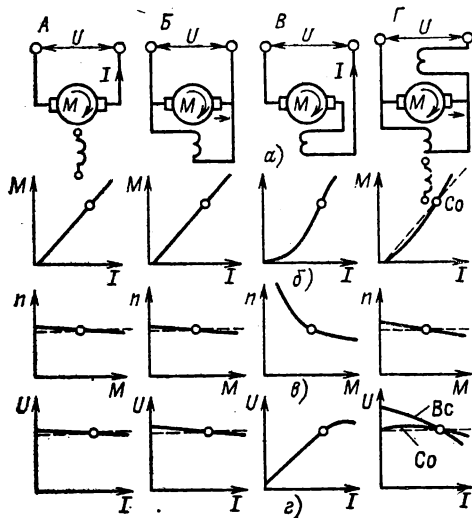


Рис. 24.88. Схемы возбуждения и основные свойства машин постоянного тока:

А — независимое возбуждение; Б — параллельное возбуждение; В — последовательное возбуждение; Г — смешанное возбуждение; а — схемы; б — зависимость вращающего момента на валу от тока якоря в режиме двигателя; в — механическая характеристика в режиме двигателя; г — внешняя характеристика в режиме генератора; I_0 — согласное включение параллельной и последовательной обмоток; I_c — встречное включение

В табл. 24.20 даны краткие сведения о свойствах основных типов двигателей и генераторов постоянного тока.

Таблица 24.20. Основные типы машин постоянного тока

А. Машина с независимым возбуждением (рис. 24.88, А)

Обмотка возбуждения машины питается от постороннего источника постоянного тока. Машины с независимым возбуждением применяются в качестве генераторов с весьма широкими пределами регулирования напряжения (от $U=0$ до $U_{ном}$ и выше). Двигатели с независимым возбуждением используются в схеме генератор — двигатель, в которой регулирование частоты вращения двигателя осуществляется путем изменения напряжения на выводах двигателя (см. разд. 50).

Машины с независимым возбуждением при постоянном напряжении на выводах якоря имеют такие же свойства, как и машины с параллельным возбуждением.

Б. Машины параллельного возбуждения (рис. 24.88, Б)

Обмотка возбуждения машины включена параллельно выводам якоря. Частота вращения двигателя при постоянном напряжении мало зависит от нагрузки и уменьшается на 2—8 % при переходе от холостого хода к номинальному режиму. Частота вращения двигателя может быть изменена в пределах 1:1,5 (1:3) путем регулирования тока с помощью реостата в цепи обмотки возбуждения. Частота вращения двигателя при увеличении температуры окружающей среды на 50 °С может возрастать на 5—10 %. С целью расширения пределов регулирования частоты вращения двигатель снабжают небольшой последовательной (стабилизирующей) обмоткой или компенсационной обмоткой [23.1].

Напряжение генераторов с параллельным возбуждением увеличивается при сбросе номинальной нагрузки на 5—25 % и может регулироваться путем изменения сопротивления в цепи возбуждения в пределах 1:1,3 (1:1,5).

В. Машина последовательного возбуждения (рис. 24.88, В)

Обмотка возбуждения машины включена последовательно с якорем. Машина с последовательным возбуждением применяется главным образом в качестве двигателя для подъемных устройств, в электрической тяге и металлургии.

Частота вращения двигателя при изменении мощности от номинальной до $1/4$ номинальной увеличивается примерно в 1,5—2 раза. Уменьшение момента на валу двигателя до нуля нельзя допускать, так как при этом частота вращения двигателя будет разрушен. Обычно допускается нагрузка не ниже $0,2P_{ном}$. Путем шунтирования обмотки возбуждения и введения сопротивления в цепи якоря частота вращения двигателя может регулироваться в широких пределах. Генераторы последовательного возбуждения применяются только в специальных установках (например, тепловозах).

Г. Машина со смешанным возбуждением (рис. 24.88, Г)

Наиболее часто имеют только параллельную и последовательную обмотки. Двигатели с согласной включенной последовательной обмоткой имеют более мягкую, чем двигатели с параллельным возбуждением, механическую характеристику, но более жесткую, чем двигатели с последовательным возбуждением (см. разд. 50).

Изменение напряжения генератора при согласном включении последовательной обмотки может быть уменьшено по сравнению с напряжением генератора параллельного возбуждения.

При встречном включении последовательной обмотки внешняя характеристика смягчается. Генераторы для возбуждения крупных синхронных машин с целью расширения пределов регулирования возбуждения снабжают независимой, параллельной и последовательной обмотками.

Ниже помещены основные сведения, необходимые для построения характеристик и выбора главных размеров двигателей и генераторов постоянного тока общего назначения. Вопросы проектирования двигателей постоянного тока подробно рассматриваются в [24.21, 24.29, 24.33].

Более подробные сведения о характеристиках двигателей постоянного тока, а также рекомендации по выбору этих двигателей имеются в разд. 50.

Расчет пусковых реостатов, вводимых в цепи якорей двигателей при пуске, и регулировочных реостатов в цепях обмоток возбуждения, применяемых для регулирования частоты вращения и вращающего момента двигателей или напряжения генераторов, может быть произведен по указаниям в разд. 50.

24.35. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НОРМАЛЬНЫМ МАШИНАМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Требования ГОСТ 183-74, которые распространяются на все типы электрических машин и, в частности, на машины постоянного тока, изложены в § 23.9.

1. Допускаемые отклонения напряжения — см. § 23.9, п. 4.
2. Кратковременная перегрузка по току — см. § 23.9, п. 6.
3. Допустимое повышение частоты вращения — см. § 23.9, п. 7.
4. Обозначение выводов — см. § 23.13.
5. Степень искрения — см. § 23.9, п. 8.

Требования к специальным машинам постоянного тока приводятся в стандартах:

ГОСТ 184-71. Электродвигатели постоянного тока крановые и металлургические.

ГОСТ 304-82. Генераторы постоянного тока для дуговой электросварки.

ГОСТ 9944-77. Стартеры электрические автотракторные. Общие технические условия. ГОСТ 9443-79. Электродвигатели автотракторные постоянного тока. Общие технические условия.

ГОСТ 9632-67. Машины постоянного тока мощностью от 0,13 до 200 кВт. Основные параметры и размеры. Технические требования.

ГОСТ 20529-82. Машины электрические

постоянного тока серии 2П мощностью до 200 кВт. Технические условия.

ГОСТ 23437-79. Двигатели постоянного тока серии П2 с высотой оси вращения от 355 до 630 мм. Технические условия.

ГОСТ 19780-81. Коллекторы и кольца контактные электрических машин. Диаметры.

ГОСТ 24689-81. Щетки электрических машин. Общие технические условия.

ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия.

24.36. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Здесь приводятся основные сведения по определению главных размеров машин постоянного тока в защищенном, открытом или закрытом исполнении с искусственной внутренней вентиляцией (§ 23.7), с номинальным напряжением не выше 1000 В и параллельным или смешанным возбуждением с преобладанием МДС параллельной обмотки.

Для выбора размеров необходимо знать следующие номинальные величины: мощность $P_{ном}$ (для генераторов — электрическая мощность на выводах, для двигателей — механическая мощность на валу); частота вращения $n_{ном}$, об/мин, или $\Omega_{ном}$, рад/с; напряжение на выводах машины $U_{ном}$, В; режим работы. Предполагается, что по своим свойствам машины должны удовлетворять ГОСТ 183-74 (см. § 23.9 и 23.10).

а) Расчетная мощность для генератора

$$P_p = k_E P_{ном}; \quad k_E \approx (3 - \eta_{ном})/2,$$

для двигателя

$$P_p = k_E P_{ном}/\eta_{ном}, \quad k_E \approx (1 + \eta_{ном})/2,$$

где $k_E = E_{ном}/U_{ном}$; $\eta_{ном}$ — номинальное значение КПД можно определить (предварительно) по рис. 24.89.

б) Внешний диаметр якоря (предварительно)

$$D \approx 0,05 + 0,0377 \sqrt[3]{\frac{P_p}{\Omega_{ном}}}.$$

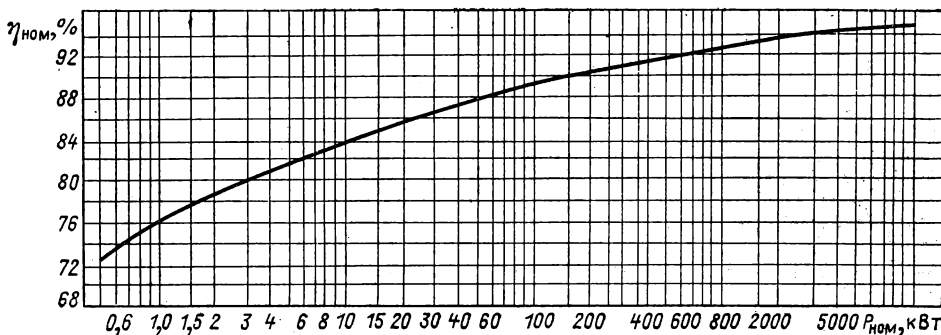


Рис. 24.89. Зависимость КПД машины постоянного тока от мощности

Таблица 24.21. Ориентировочные значения A , $B_{\delta \text{ ном}}$ и α_{δ} для машин постоянного тока

D , м	0,05	0,10	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0
$A \cdot 10^{-4}$, А/м	0,75	1,3	2,5	4,0	4,5	5,2	5,6
$B_{\delta \text{ ном}}$, Тл	0,4	0,55	0,75	0,90	0,95	1,0	1,05
α_{δ}	0,58	0,60	0,64	0,68	0,72	0,74	0,75

в) Электромагнитные нагрузки. Линейная нагрузка якоря A и средняя индукция под полюсом при номинальном режиме работы $B_{\delta \text{ ном}}$ предварительно могут быть выбраны в зависимости от D по табл. 24.21.

г) Расчетная длина машины

$$l_{\delta} = \frac{2P_p}{\pi \alpha_{\delta} A B_{\delta \text{ ном}} D^2 \Omega_{\text{ном}}}.$$

где α_{δ} — по табл. 24.21 (для машин с дополнительными полюсами); $\alpha_{\delta} = 0,6 \div 0,85$ — для машин без дополнительных полюсов.

д) Отношение l_{δ}/D для машин общего назначения находится в пределах 0,4—1,25.

Более подробные сведения по проектированию машин постоянного тока можно найти в [24.21, 24.29, 24.33].

24.37. ЭДС, МДС и СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

Схемы якорных обмоток машин постоянного тока описаны в § 23.23.

Электродвижущая сила на щетках якоря, B ,

$$E = \frac{p \Omega}{2\pi} \frac{N}{a} \Phi = 4f\omega\Phi = c_e \Omega \Phi,$$

где N — число эффективных проводов якоря (см. § 23.23); $\omega = N/4a$ — число витков в параллельной ветви якоря; $f = p\Omega/2\pi$ — частота; $\Omega = \pi n/30$ — угловая скорость якоря, рад/с; n — частота вращения, об/мин; Φ — магнитный поток на один полюс; $c_e = pN/2\pi a$ — постоянная для машины величина.

Примечание. Здесь и в дальнейшем, если это особо не оговорено, предполагается, что щетки установлены на геометрической нейтральной.

Магнитодвижущие силы полюсных обмоток на один полюс. Параллельная (или независимая) обмотка возбуждения (создает продольное поле)

$$F_B = I_B \omega_B.$$

Последовательная обмотка возбуждения (создает продольное поле)

$$F_{\Pi} = I_{\Pi} \omega_{\Pi} \approx I_A \omega_{\Pi}.$$

Обмотка дополнительных полюсов (образует поперечное поле)

$$F_d = I_A \omega_d;$$

где ω_B , ω_{Π} , ω_d — число витков на один полюс.

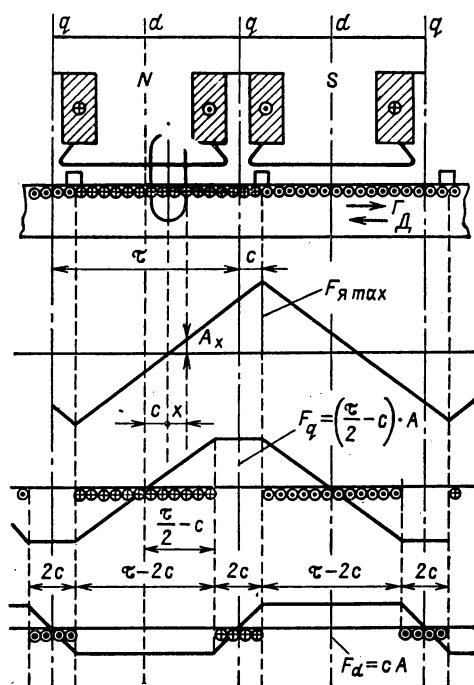


Рис. 24.90. Диаграмма МДС якоря и ее составляющих при щетках, сдвинутых с геометрической нейтральной

Наибольшее значение МДС якоря (рис. 24.90)

$$F_{\text{я max}} = A \tau/2,$$

где $A = NI_a/2a\pi D$ — линейная нагрузка якоря; D — диаметр якоря; $\tau = \pi D/2p$ — полюсное деление.

Наибольшее значение поперечной МДС якоря

$$F_q = \left(\frac{\tau}{2} - c \right) A,$$

где $c = \beta D/2$ — сдвиг щеток с геометрической нейтральной (рис. 24.90); β — см. рис. 24.87.

Наибольшее значение продольной МДС якоря

$$F_d = cA.$$

Примечание. При щетках на геометрической нейтральной $F_q = F_{\text{я max}}$; $F_d = 0$ и МДС под краем полюса $\pm Ab_{\delta}/2$.

Сопротивление обмотки якоря при t , °С.

$$R_A = \rho_t \frac{L}{S(2a)},$$

где $L = \frac{N}{2a} l_{cp} = 2\omega l_{cp}$ — длина проводников

одной параллельной ветви; l_{cp} — средняя длина полувитка ($l_{cp} \approx l + 1,4\tau$); ρ_t — см. § 23.28; S — сечение эффективного провода обмотки якоря; $S = c_s S_a$; S_a — сечение элементарного провода; c_s — число элементарных проводников в эффективном проводе (см. § 23.23).

Сопротивление параллельной обмотки при $t, ^\circ\text{C}$, и последовательном соединении катушек

$$r_B = \rho_t \frac{4p l_B w_B}{S_B},$$

где l_B — средняя длина полувитка обмотки; S_B — сечение провода.

Примечание. Сопротивления других полюсных обмоток подсчитываются по аналогичной формуле.

Сопротивление цепи якоря с учетом сопротивления последовательно включенных обмоток и переходного сопротивления в щеточном контакте

$$r_{\text{я}} = R_{\text{я}} + r_{\text{п}} + r_{\text{д}} + r_{\text{к,п}} + \Delta U_{\text{щ}} / I_{\text{я,ном}},$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ — переходное падение напряжения на пару щеток; $r_{\text{п}}$ — сопротивление последовательной обмотки; $r_{\text{д}}$ — сопротивление обмотки дополнительных полюсов; $r_{\text{к,п}}$ — сопротивление компенсационной обмотки (см. [24.33, 24.34]).

24.38. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

При расчете характеристики намагничивания машины (характеристики холостого хода) индукции и магнитные напряжения определяются для магнитных потоков $\Phi_B = 0,5\Phi_{B,\text{ном}}$; $0,8\Phi_{B,\text{ном}}$; $1,1\Phi_{B,\text{ном}}$; $1,25\Phi_{B,\text{ном}}$ и $\Phi_{B,\text{ном}}$, при этом индукции при номинальном потоке $\Phi_{B,\text{ном}}$ не должны превосходить значений, указанных в табл. 24.22.

Магнитный поток $\Phi_{B,\text{ном}}$ при холостом ходе и номинальной частоте вращения $n_{\text{ном}}$ и напряжении $E = U_{\text{ном}}$ определяется по § 24.37:

$$\Phi_{B,\text{ном}} = \frac{2\pi a U_{\text{ном}}}{\rho \Omega N} = \frac{U_{\text{ном}}}{c_E \Omega}.$$

Магнитный поток при номинальной нагрузке

$$\Phi_{\text{ном}} = k_E \Phi_{B,\text{ном}},$$

где $k_E = E_{\text{ном}} / U_{\text{ном}}$ (см. § 24.36).

Таблица 24.22. Значения магнитных индукций для нормальных машин постоянного тока

Участки магнитной цепи	Индукция, Тл
Ярмо якоря (B_a): при $\rho > 1$ при $\rho = 1$	1—1,5 До 1,6
Зубцы якоря посредине высоты при овальных или трапециевидных пазах (B_2)	1,7—1,9
Зубцы якоря в наиболее узком сечении при пазах с параллельными стенками (B_2)	2,1—2,3
Сердечник полюса (B_m): из стали 1211, Ст1, Ст3 из стали 3413	1,4—1,5 1,7
Ярмо станины (B_s): из стального листа или проката из чугунного литья (крайне редко)	1,1—1,3 0,5—0,6

Примечание. Для зубцов в таблице приведены кажущиеся значения индукций, найденные без учета вытеснения потока в паз (см. § 24.6).

Максимальная индукция в воздушном зазоре при холостом ходе и потоке Φ_B

$$B_\delta = \frac{\Phi_B}{\alpha_\delta \tau l_\delta},$$

где $\alpha_\delta = b_\delta / \tau \approx (b_p + 2\delta) / \tau$ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия (в некоторых случаях, например при неравномерном зазоре или скошенном полюсном наконечнике, $b_\delta \approx b_p$); δ — зазор между главным полюсом и якорем; b_p — ширина полюсного наконечника (по окружности зазора).

Магнитное напряжение зазора $F_{\delta 12}$, магнитное напряжение зубцов F_z и ярма F_a якоря на один полюс рассчитываются по § 24.6.

Магнитное напряжение полюсов F_m , подполюсного воздушного зазора $F_{\delta m}$ и ярма станины F_s рассчитываются по § 24.26, причем длины участков магнитной цепи берутся по рис. 24.86; индексы $a1, z1, a2$ заменяются соответственно индексами a, z, s . Коэффициент рассеяния полюсов принимается равным:

$$\sigma_m \approx 1,15 \div 1,20.$$

Результирующая МДС магнитной цепи при холостом ходе (на один полюс)

$$F_B = F_{\delta 12} + F_{\delta m} + F_z + F_m + F_a + F_s.$$

Магнитное напряжение воздушного зазора, зубцов и ярма якоря (на один полюс)

$$F_{\delta z} = F_{\delta 12} + F_z + F_a.$$

В результате расчета цепи могут быть построены: *переходная характеристика* (рис. 24.91)

$$\Phi_B \sim \frac{E_B}{n} \sim B_\delta = f(F_{\delta z}),$$

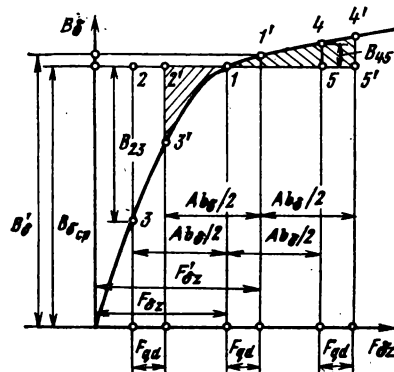


Рис. 24.91. Определение размагничивающего действия поперечной МДС якоря.

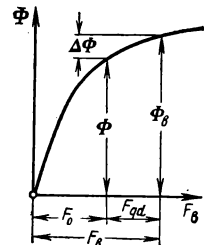


Рис. 24.92. Характеристика намагничивания машины постоянного тока

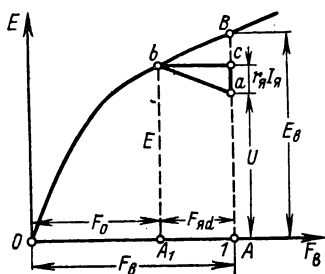


Рис. 24.93. Определение напряжения U или МДС возбуждения F_B

характеристика намагничивания (рис. 24.92)

$$\Phi_B \sim \frac{E_B}{n} \sim B_\delta = f(F_B)$$

и характеристика холостого хода (рис. 24.93)

$$E_B = E = f(F_B).$$

24.39. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРИ НАГРУЗКЕ

При включении машины постоянного тока на нагрузку по обмотке якоря протекает ток ($I_a \neq 0$) и магнитное поле в машине создается совместным действием МДС обмотки возбуждения и МДС обмотки якоря.

Если щетки установлены на геометрической нейтрали (см. рис. 24.90, $c=0$), то МДС якоря создает поле, направленное по поперечной оси (поперечная реакция якоря). При сложении с полем обмотки возбуждения поле поперечной реакции якоря увеличивает магнитный поток под одним краем полюса и уменьшает под другим. В ненасыщенной машине результирующий поток полюсов остается неизменным. Однако при насыщении увеличение магнитного потока под одним краем полюса меньше уменьшения магнитного потока под другим полюсом.

Результирующий магнитный поток насыщенной машины под действием поперечной реакции якоря уменьшается. Это явление носит название *размагничивающего действия поперечной реакции якоря*.

Количественная оценка размагничивающего действия тока якоря производится с помощью переходной характеристики $B_\delta = f(F_{\delta z})$ (см. § 24.38, рис. 24.91).

Пусть при холостом ходе магнитное состояние машины характеризуется магнитным потоком Φ_B , индукцией в зазоре B_δ и соответствующей МДС $F_{\delta z}$.

Под нагрузкой кривая индукции магнитного поля в воздушном зазоре рассчитывается по суммарной МДС обмотки возбуждения и обмотки якоря и соответствует участку $3'1'4'$ переходной характеристики (см. рис. 24.91). Под краями полюсов индукция определяется по МДС ($F_{\delta z} \pm Ab_\delta/2$), где A — линейная нагрузка. Площадь фигуры под кривой $3'1'4'$ пропорциональна потоку машины при нагруз-

ке Φ , которому соответствует среднее значение индукции под полюсом $B_{\delta \text{ ср}}$:

$$B_{\delta \text{ ср}} = \Phi / \alpha_\delta \tau l_\delta.$$

Индукция $B_{\delta \text{ ср}}$ на переходной характеристике соответствует МДС $F_{\delta z}$, которая при холостом ходе создает тот же магнитный поток Φ , что и МДС $F'_{\delta z}$ при нагрузке.

$F_{qd} = (F'_{\delta z} - F_{\delta z})$ — МДС, на которую необходимо увеличить МДС обмотки возбуждения, чтобы скомпенсировать размагничивающее действие поперечной реакции якоря.

Точно F_{qd} можно определить путем графических построений, передвигая ординаты 23 и 45 на отрезок $F_{qd} \sim 22' = 55'$ так, чтобы площади треугольников $12'3'$ и $14'5'$ были равны (см. рис. 24.91).

Приближенно F_{qd} может быть найдено по формуле Г. Н. Петрова

$$F_{qd} \approx \frac{1}{6} \frac{B_{23} - B_{45}}{B_{23} + B_{45}} Ab_\delta.$$

Магнитный поток, который будет в машине после сброса нагрузки ($I_a = 0$) при сохранении той же МДС возбуждения F_B ,

$$\Phi_B = \alpha_\delta B'_\delta l_\delta \tau.$$

Уменьшение магнитного потока под действием поперечной реакции якоря

$$\Delta \Phi = \Phi_B - \Phi.$$

При нагрузке МДС обмоток возбуждения

$$F_B = F_0 + F_{qd},$$

где F_0 — результирующая продольная МДС, соответствующая по характеристике намагничивания (см. рис. 24.92) потоку $\Phi = E/c_e \Omega$ (c_e — см. § 24.37).

При номинальной нагрузке МДС обмоток возбуждения

$$F_{B, \text{ ном}} = F_{0, \text{ ном}} + F_{qd, \text{ ном}},$$

где $F_{0, \text{ ном}}$ — результирующая продольная МДС, соответствующая по рис. 24.92 потоку

$$\Phi_{\text{ ном}} = E_{\text{ ном}} / c_e \Omega_{\text{ ном}}$$

($E_{\text{ ном}} = k_E U_{\text{ ном}}$ — см. § 24.36); $F_{qd, \text{ ном}}$ определено для $\Phi_{\text{ ном}}$ и $I_{a, \text{ ном}}$.

С учетом влияния МДС последовательной обмотки, реакции коммутируемых секций и при небольшом сдвиге щеток с нейтрали МДС обмоток возбуждения при нагрузке

$$F_B \approx F_0 + F_{ad},$$

где $F_{ad} \approx F_{qd} \pm F_d \pm F_n$ — МДС обмотки возбуждения, компенсирующая действие МДС тока якоря; знак плюс — при размагничивающем, а знак минус — при намагничивающем действии составляющей МДС тока якоря; F_d — продольная МДС якоря (см. § 24.37), определенная с учетом продольной МДС коммутируемых секций (в практических расчетах при установке щеток на нейтрали эту МДС не учитывают, полагая $F_d = 0$); $F_n = \omega_n I_a$ — МДС последовательной обмотки.

24.40. УРАВНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ

Уравнение напряжений якоря $U = E \pm I_{\text{я}} r_{\text{я}}$, где знак плюс — для режима двигателя; знак минус — для режима генератора; U — напряжение на щетках якоря ($E = E_{\text{ном}}$ при $I_{\text{я}} = I_{\text{я, ном}}$ и $U = U_{\text{ном}}$).

Определение напряжения U или МДС параллельной (или независимой) обмотки возбуждения $F_{\text{в}}$ производится при помощи характеристики холостого хода, построенной для заданной частоты вращения Ω и характеристического треугольника abc (см. рис. 24.93), катеты которого определяются формулами

$$bc \sim F_{\text{ад}} = F_{\text{qd}} \pm F_{\text{д}} \pm F_{\text{п}};$$

$$ac \sim I_{\text{я}} r_{\text{я}},$$

где знак плюс соответствует размагничивающему действию составляющих МДС от тока якоря, знак минус — намагничивающему действию.

На рис. 24.93 построение выполнено для режима генератора при $bc \sim F_{\text{qd}} \pm F_{\text{д}} \pm F_{\text{п}} > 0$, построение для режима двигателя аналогично, но точка a лежит выше точки c . В случае намагничивающего действия МДС от тока якоря $bc \sim F_{\text{ад}} < 0$, которое может проявиться при согласном включении последовательной обмотки, вершина b треугольника должна располагаться правее вершины c (см. рис. 24.102).

Электромагнитный вращающий момент

$$M = \left[\frac{PN}{2\pi a} \right] I_{\text{я}} \Phi = c_M I_{\text{я}} \Phi,$$

где $c_M = c_e = pN/2\pi a$ — постоянная, зависящая от обмоточных данных машины.

Вращающий момент, передаваемый валом,

$$M_{\text{вал}} = M \pm \frac{P_{\text{м}} + P_{\text{м, д}} + P_{\text{т}} + P_{\text{щ, т}}}{\Omega},$$

где $P_{\text{м}}$, $P_{\text{м, д}}$, $P_{\text{т}}$, $P_{\text{щ, т}}$ — см. § 24.43; знак плюс — для генератора, знак минус — для двигателя.

24.41. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Характеристики генераторов могут быть получены опытным путем или построены графически при помощи характеристики холостого хода и характеристического треугольника, как показано на рис. 24.95—24.97. Все характеристики определяются при постоянной частоте вращения $\Omega = \text{const}$.

Для нормальных машин постоянного тока с дополнительными полюсами и щетками, установленными на геометрической нейтральной, горизонтальный катет характеристического треугольника, который пропорционален току возбуждения, компенсирующему МДС якоря, определяют при $\Phi \approx \Phi_{\text{ном}}$ по формуле

$$\begin{aligned} bc &\sim \frac{F_{\text{ад}}}{\omega_{\text{в}}} \approx \frac{F_{\text{qd}} \pm F_{\text{п}}}{\omega_{\text{в}}} \approx \\ &\approx \frac{F_{\text{qd, ном}} \pm F_{\text{п, ном}}}{\omega_{\text{в}}} \left(\frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{я, ном}}} \right). \end{aligned}$$

В практических расчетах эти зависимости используются и при больших отклонениях от номинального значения. Если требуется большая точность, то $F_{\text{ад}}$ должно быть найдено при помощи построения по рис. 24.91 для каждого потока и тока (в случае необходимости методом последовательных приближений). При $\Phi \approx \approx 0$ МДС $F_{\text{ад}} \approx 0$.

Примечание. Все построения проводятся при допущении, что напряжение при $I_{\text{в}} = 0$ (остаточное напряжение) $E_{\text{ост}} = 0$. При $E_{\text{ост}} \neq 0$ метод построения характеристик не изменяется.

Характеристики генератора с независимым возбуждением. Схема включения обмоток генератора показана на рис. 24.94, а. Построение

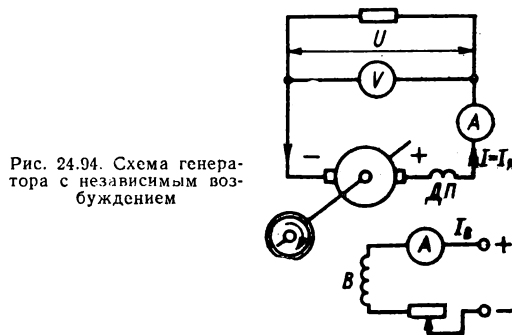


Рис. 24.94. Схема генератора с независимым возбуждением

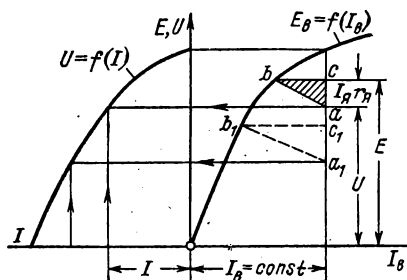


Рис. 24.95

внешней характеристики $U = f(I) = f(I_{\text{я}})$ производится (рис. 24.95) при постоянном значении тока возбуждения в независимой обмотке ($I_{\text{в}} = \text{const}$) и $n = \text{const}$. Характеристики холостого хода представляются в виде зависимости ЭДС от тока возбуждения

$$I_{\text{в}} = F_{\text{в}} / \omega_{\text{в}}.$$

Катеты характеристического треугольника определяются, как было пояснено выше, и могут считаться пропорциональными току якоря. При каждом выбранном токе якоря I треугольник размещают таким образом, чтобы точка b лежала на характеристике холостого хода, а точка c — на линии $I_{\text{в}} = \text{const}$. При этом расстояние от точки a до оси абсцисс пропорционально напряжению генератора U . Изменение напряжения генератора (при $I_{\text{в}} = I_{\text{в, ном}}$) при изменении тока якоря от $I = 0$ до $I = I_{\text{ном}}$ называется номинальным изменением напряжения генератора $\Delta U_{\text{ном}}$.

б) Построение регулировочной характеристики $I_{\text{в}} = f(I) = f(I_{\text{я}})$ производится (рис. 24.96)

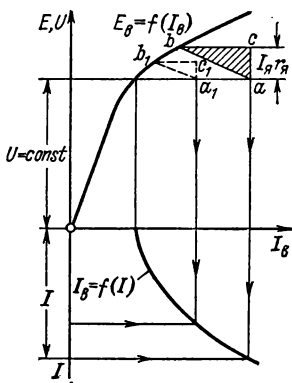


Рис. 24.96

при заданном постоянном значении напряжения генератора $U = \text{const}$. При каждом выбранном токе I треугольник размещают таким образом, чтобы точка a лежала на линии $U = \text{const}$, а точка b — на характеристике холостого хода. При этом расстояние от точки a до оси ординат пропорционально требуемому току возбуждения I_a .

в) Построение нагрузочной характеристики $U = f(I_a)$ производится (рис. 24.97) при заданном постоянном значении тока генератора $I = I_a = \text{const}$, которому при номинальном напряжении соответствуют определенные размеры треугольника abc . В первом приближении можно считать, что размеры треугольника при изменении напряжения и тока возбуждения сохраняются. Тогда, перемещая треугольник таким образом, чтобы точка b лежала на характеристике холостого хода, можно найти требуемую зависимость (расстояние от точки a до оси абсцисс пропорционально напряжению U , а расстояние от точки a до оси ординат — току возбуждения I_a).

г) Построение характеристики короткого замыкания $I_k = I_a = f(I_a)$ производится (рис. 24.98) при $U = 0$ и $n = \text{const}$ (точка a характеристического треугольника располагается на оси абсцисс, точка b — на характеристике холостого хода). При определении размеров треугольника abc считается, что $F_{qd} = 0$ и учитывается только продольная МДС якоря (см. выше). Ток возбуждения при заданном токе короткого замыкания пропорционален расстоянию от точки a до оси ординат.

Характеристики генератора параллельного возбуждения. Схема включения обмоток генератора показана на рис. 24.99.

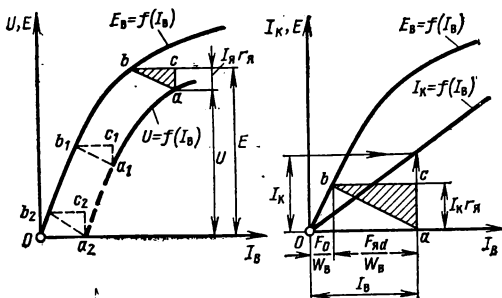
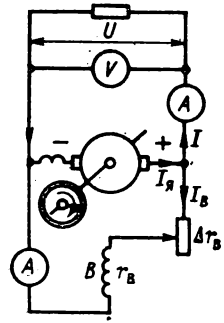


Рис. 24.97

Рис. 24.98

Рис. 24.99. Схема генератора параллельного возбуждения



При построении необходимо учитывать, что напряжение на обмотке возбуждения $U_b = R_b I_b$ должно равняться напряжению на якоре $U = E - r_a I_a$, причем $I_a = I + I_b \approx I$. В этих уравнениях $R_b = r_b + \Delta r_b$; r_b — сопротивление параллельной обмотки; Δr_b — сопротивление регулировочного реостата.

а) Построение внешней характеристики $U = f(I)$ производится (рис. 24.100) при $R_b = \text{const}$. Напряжение на обмотке возбуждения изображается линией $U_b = R_b I_b$. Точка a треугольника abc , расстояние от которой до оси абсцисс пропорционально напряжению на якоре U , должна лежать при всех значениях тока на линии U_b ($U = U_b$).

б) Построение регулировочной и нагрузочной характеристики генератора не отличается от построения соответствующих характеристик генератора с независимым возбуждением, если считать $I \approx I_a$.

Характеристика короткого замыкания генератора снимается при независимом возбуждении.

Характеристики генератора смешанного (параллельно-последовательного) возбуждения. Генератор имеет параллельную B и последовательную Π обмотки возбуждения, схема включения которых показана на рис. 24.101.

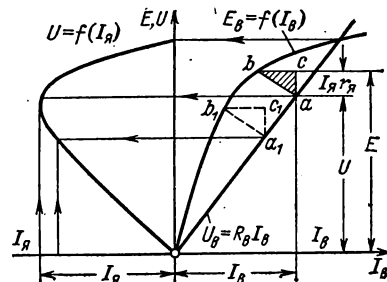


Рис. 24.100

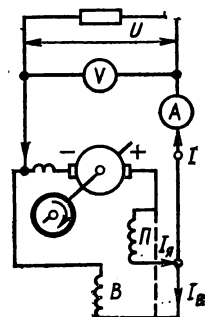


Рис. 24.101. Схема генератора параллельно-последовательного возбуждения

где $\Sigma S_{\text{ш}}$ — суммарная площадь контакта всех щеток, м^2 ; v_k — окружная скорость коллектора, м/с .

Механические потери (с учетом потерь на вентиляцию):

а) машины с вентилятором на валу (с самовентиляцией)

$$P_T = \left(\frac{P_{\text{ном}}}{1000} + 1 \right) \frac{v_{\text{я}} (20 + v_{\text{я}})}{300} + 0,036 P_{\Sigma} \left(\frac{v_{\text{я}}}{20} \right)^2,$$

где P_{Σ} — сумма всех ранее определенных потерь при номинальной нагрузке; $v_{\text{я}}$ — окружная скорость якоря, м/с ;

б) машины с естественной или независимой вентиляцией

$$P_T = \frac{P_{\text{ном}}}{1000} \frac{v_{\text{я}} (v_{\text{я}} + 20)}{350}.$$

Полные потери при номинальной нагрузке

$$\Sigma P = P_M + P_{\text{мд}} + P_{\text{в}} + P_{\text{в}} + P_{\text{д}} + P_{\text{ш,т}} + P_T.$$

Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке

$$\eta_{\text{ном}} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_{\text{ном}} + \Sigma P},$$

где $P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}$ — для генератора; $P_{\text{ном}} = P_{\text{вал(ном)}}$ — для двигателя.

Список литературы

- 24.1. Алексеев А. Е. Конструкция электрических машин. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1958. 426 с.
- 24.2. Абрамов А. И., Иванов-Смоленский А. В. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. М.: Высшая школа, 1978. 312 с.
- 24.3. Бернштейн Л. М. Изоляция электрических машин общего назначения. М.: Энергоиздат, 1981. 376 с.
- 24.4. Видеман Е., Келленбергер В. Конструкции электрических машин/Пер. с нем. Л.: Энергия, 1972. 520 с.
- 24.5. Пекне В. З. Синхронные компенсаторы. М.: Энергия, 1980. 272 с.
- 24.6. Гурий Я. С., Кузнецов Б. И. Проектирование серий электрических машин. М.: Энергия, 1978. 480 с.
- 24.7. Данилевич Я. Б., Домбровский В. В., Казовский Е. Я. Параметры электрических машин переменного тока. М.: Наука, 1965. 339 с.
- 24.8. Данилевич Я. Б., Кашарский Э. Г. Добавочные потери в электрических машинах. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963. 214 с.

- 24.9. Проектирование гидрогенераторов/В. В. Домбровский, А. С. Еремеса, Н. И. Иванов и др. Т. 1. Л.: Энергия, 1965. 258 с.; т. 2. Л.: Энергия, 1968. 364 с.
- 24.10. Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974. 504 с.
- 24.11. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергия, 1968. 574 с.
- 24.12. Иванов-Смоленский А. В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. М.: Энергия, 1969. 304 с.
- 24.13. Костенко М. П., Гнедин Л. П. Теория и расчет трехфазных коллекторных машин и каскадных систем. М.: Наука, 1964. 380 с.
- 24.14. Лифшиц-Гарик М. Обмотки машин переменного тока/Пер. с англ. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1958. 766 с.
- 24.15. Нейман З. Б., Пекне В. З., Моз Л. С. Крупные вертикальные электродвигатели переменного тока. М.: Энергия, 1974. 376 с.
- 24.16. Лопухина Е. М., Сомихина Г. С. Проектирование асинхронных микромашин с полым ротором. М.: Энергия, 1968. 328 с.
- 24.17. Постников И. М. Проектирование электрических машин. — Киев: Гостехиздат УССР, 1960. 910 с.
- 24.18. Рихтер Р. Электрические машины/Пер. с нем. Т. 1. М. — Л.: ОНТИ, 1935. 600 с.; т. 2. М. — Л.: ОНТИ, 1936. 688 с.; т. 4. М. — Л.: ГОНТИ, 1939. 471 с.
- 24.19. Сандлер А. С. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей. М.: Энергия, 1966. 320 с.
- 24.20. Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горянов Ф. А. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1969. 632 с.
- 24.21. Проектирование электрических машин/И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. М.: Энергия, 1980. 496 с.
- 24.22. Асинхронные двигатели общего назначения/Е. П. Бойко, Ю. В. Ганцов, Ю. М. Ковалев и др.; под ред. В. М. Петрова и А. Э. Кравчика. М.: Энергия, 1980. 488 с.
- 24.23. Сыромятников И. А. Режимы работы синхронных генераторов. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1952. 199 с.
- 24.24. Турбогенераторы/В. В. Титов и др. Л.: Энергия, 1967. 895 с.
- 24.25. Харитонов А. М. Многоскоростные электродвигатели. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1954. 224 с.
- 24.26. Шуйский В. П. Расчет электрических машин/Пер. с нем. Л.: Энергия, 1968. 731 с.
- 24.27. Проектирование тяговых электрических машин/Под ред. М. Д. Находкина. М.: Транспорт, 1976. 624 с.
- 24.28. Алексеев А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. Л.: Энергия, 1967. 432 с.
- 24.29. Гурий Я. С., Курочкин М. Н. Проектирование машин постоянного тока. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1961. 351 с.
- 24.30. Ермолин Н. П. Расчет коллекторных машин малой мощности. Л.: Энергия, 1973. 216 с.
- 24.31. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1957. 247 с.
- 24.32. Морозов А. Г. Расчет электрических машин постоянного тока. М.: Высшая школа, 1977. 264 с.
- 24.33. Рабинович И. Н., Шубов И. Т. Проектирование машин постоянного тока. Л.: Энергия, 1967. 504 с.
- 24.34. Толвинский В. А. Электрические машины постоянного тока. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1956. 468 с.
- 24.35. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.

Раздел 25

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

СОДЕРЖАНИЕ

А. Асинхронные машины

- 25.1. Общие сведения о сериях асинхронных двигателей, выпускаемых в СССР 343
- 25.2. Трехфазные асинхронные двигатели еди-

- ной серии АН-2 и АKN-2 мощностью свыше 1000 кВт 343
- 25.3. Трехфазные асинхронные двигатели серии 4А мощностью 0,06—400 кВт 345
- 25.4. Специальные исполнения двигателей серии 4А 352

25.5. Трехфазные асинхронные двигатели серии АИ	355	хронные микродвигатели типов ДСК, ДСКР (388). Синхронные гистерезисные двигатели (390). Синхронные реактивные двигатели (391). Однофазные синхронные двигатели типов ДСД, ДСДР (392).	
25.6. Крановые и металлургические асинхронные двигатели	359		
25.7. Асинхронные микродвигатели	361		
Общие сведения (361). Трехфазные асинхронные микродвигатели (363)			
25.8. Однофазные асинхронные микродвигатели	363	25.16. Тихоходные синхронные двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения	393
Общие сведения (363). Универсальные двигатели переменного тока (367)		В. Машины постоянного тока и коллекторные двигатели переменного тока	
Б. Синхронные машины		25.17. Общие сведения о сериях машин постоянного тока, выпускаемых в СССР	395
25.9. Общие сведения о синхронных машинах большой и средней мощности, выпускаемых в СССР	371	25.18. Двигатели постоянного тока единой серии 2П мощностью до 200 кВт	396
25.10. Турбогенераторы	373	25.19. Металлургические и крановые двигатели постоянного тока серии Д	398
25.11. Гидрогенераторы	376	25.20. Коллекторные микродвигатели постоянного тока, переменного тока и универсальные.	400
25.12. Синхронные компенсаторы	376	Общие сведения о микродвигателях постоянного тока (400). Двигатели постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением (400). Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами (400). Двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением (402). Коллекторные микродвигатели переменного тока (402). Универсальные коллекторные двигатели (403).	
25.13. Синхронные генераторы и двигатели общего назначения	377	25.21. Бесконтактные двигатели постоянного тока	404
25.14. Перспективные типы крупных синхронных машин	381	25.22. Трехфазные коллекторные двигатели	406
25.15. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами, гистерезисные и реактивные	384	Список литературы	407
Основные особенности. Классификация (384). Синхронные двигатели с постоянными магнитами (384). Тихоходные многополюсные синхронные микродвигатели с постоянными магнитами (385). Тихоходные однофазные микродвигатели типов ДСО, ДСОР (386). Тихоходные многополюсные конденсаторные син-			

А. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

25.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЕРИЯХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ВЫПУСКАЕМЫХ В СССР

Наибольшее распространение в народном хозяйстве имеют двигатели единых серий асинхронных электродвигателей, которые изготавливаются на все необходимые номинальные мощности как в основном исполнении, так и в различных модификациях. В табл. 25.1 дан обзор основных серий трехфазных асинхронных электродвигателей, выпускаемых в СССР.

25.2. ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ЕДИНОЙ СЕРИИ АН-2 И АКН-2 МОЩНОСТЬЮ СВЫШЕ 1000 кВт

Двигатели серии АН-2 15—17-го габаритов и АКН-2 15—19-го габаритов разработаны вместо двигателей АН и АКН 14—18-го габаритов

и имеют более высокие технические показатели.

Двигатели с короткозамкнутым ротором серии АН-2 предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (насосы, вентиляторы и др.). Исполнение двигателей защищенное, с самовентиляцией, на щитовых подшипниках качения.

Двигатели с фазным ротором серии АКН-2 предназначены для привода шахтно-подъемных и других механизмов, требующих регулирования частоты вращения, а также механизмов с тяжелыми условиями пуска и эксплуатации. Двигатели 15—17-го габаритов исполняются защищенными (степень защиты IP20, см. § 23.7) с двумя щитовыми подшипниками качения. Двигатели 18—19-го габаритов исполняются открытыми (степень защиты IP00) с двумя стояковыми подшипниками.

Номинальные мощности и частоты вращения двигателей серии АН-2 и АКН-2 приведены в табл. 25.2.

Т а б л и ц а 25.1. Основные серии трехфазных асинхронных двигателей, выпускаемых в СССР

Серия, тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	n (синхр.), об/мин	$U_{\text{ном}}$, В	Исполнение, область применения
Двигатели с короткозамкнутым ротором				
<i>Двигатели общего назначения</i>				
4А (с высотами оси вращения 50—355 мм)	0,06—400	500; 600; 750; 1000; 1500; 3000	220/380; 380/660; 220; 380; 660	Защищенные и закрытые, обдуваемые, самого широкого применения
4АР	15—45	750; 1000; 1500	380/660; 220/380	Закрытые, обдуваемые с повышенным пусковым моментом
4АС	0,3—63 при $\eta \geq 40\%$	750; 1000; 1500; 3000	220/380; 220/380; 380/660	Закрытые, обдуваемые, с повышенным скольжением
АН-2 (15—17-й габариты)	500—2000	375; 500; 600; 750; 1000	6000	Защищенные; для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения

Продолжение табл. 25.1

Серия, тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	n (синхр.), об/мин	$U_{\text{ном}}$, В	Исполнение, область применения
АТД2	500—5000	3000	6000	С замкнутым или разомкнутым циклом вентиляции; для привода быстроходных механизмов
ВАСВ	30—200	115—187,5	380; 6000	Вертикальные, с водяным охлаждением; для безредукторного привода вентиляторов градирен
АВ	400—800	1000	6000	Вертикальные, с самовентиляцией, с водяными воздухоохладителями; для привода конденсатных насосов
АВ-2000-1000	2000	1000	6000	Для привода циркуляционных насосов
АЗО	160; 1250; 1000	375; 750	6000; 10 000	Закрытые, обдуваемые; для привода дымососов
ВАН	315—2500	375; 500; 600; 750	6000	Защищенные; для привода вертикальных гидравлических насосов
ДАЗО2	250/125—1600/685	500/375; 600/500; 750/600; 750; 1000/750; 1000; 1500	6000	Одно- и двухскоростные; для привода вентиляторов, дымососов и других механизмов
А4; ДАЗО4	200—1000	500; 600; 750; 1000; 1500	6000	Для привода насосов, воздуходувок, вентиляторов, дымососов и других механизмов
ДВДА	500/315—1600/1000	375/300—600/500	6000	Защищенные, вертикальные, двухскоростные; для установки в закрытых помещениях, для привода гидравлических насосов
АВ3	630	750; 1000	6000	Вертикальные, закрытые, с принудительной вентиляцией по разомкнутому циклу; для привода прокатных станов
АВМ3	55—110	750; 1000	220/380	Вертикальные; для привода вертикальных осевых насосов
ТФМ2 ТФ2	1,3 2,6	1000 1500	220; 380; 500	Закрытые, с естественным охлаждением; для текстильной промышленности
Д; Да	0,25—4	750; 1000; 1500; 3000	220/380; 230/400; 240/415 при 50 Гц; 400; 220/380; 220/440 при 60 Гц	Закрытые, обдуваемые, имеются модификации: с повышенным скольжением, многоскоростные, малошумные, химостойкие, сельскохозяйственные
Краново-металлургические двигатели				
МТКФ	1,4—22 при ПВ=40 %	750; 1000	380/220; 500	Характеризуются повышенной перегрузочной способностью, большими пусковыми моментами, изоляция класса F; для привода крановых механизмов
МТКН	3—37 при ПВ=40 %	750; 1000	380/220; 500	То же; изоляция класса H; для приводов металлургического производства
Взрывозащищенные электродвигатели				
В; Вр	0,25—110	750; 1000; 1500; 3000	380; 380/660	Взрывонепроницаемые; общего назначения
ВАО	1,1—315; 200—2000	600; 750; 1000; 1500; 3000	220; 380; 500; 600; 6000; 220/380; 380/660; 240/415	Взрывонепроницаемые; для работы в шахтах и взрывоопасных помещениях
ВАОЛ	3—13 при ПВ=40%; 25%	750; 1500	380; 660	Закрытые обдуваемые; для привода шахтных лебедок
ВАОКр	1,17—20	1000/333; 1000/250	380; 660	Закрытые обдуваемые, двухскоростные; для привода грузовых лифтов
КО	4—100	750; 1000; 1500; 3000	380/660	Взрывонепроницаемые; для работы в каменноугольных и сланцевых шахтах
МАЗ6	22—400	750; 1000; 1500; 3000	380/660; 500	Взрывонепроницаемые; для работы во взрывоопасных помещениях и шахтах
АСВ-ГХ	0,18—0,6	1500	127; 220; 380; 500; 600	Химостойкие; для работы во взрывоопасных помещениях
«Украина»	200—1600	1500; 3000	6000	Взрывоопасные; для работы в угольных шахтах

Продолжение табл. 25.1

Серия, тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	n (синхр.), об/мин	$U_{\text{ном}}$, В	Исполнение, область применения
Специальные электродвигатели				
АВШ	55; 75; 110	1500	220/380; 380/660; 500	Защищенные, вертикальные; для привода шахтных насосов
ПЭД	17—100	3000	400—2000	Погружные; для привода глубинных насосов в нефтяной промышленности
АР	0,3—10	150—1500	380 при 50 Гц; 220 при 20 Гц	Закрытые; для привода роликов рольганга
АС, АСМ, АСШ	1,75—20	1000; 1000/330; 1000/250	220/380; 220; 380	Защищенные; одно- и двухскоростные (АСМ, АСШ); для привода лифтов
АТМК	470; 750	1000; 3000	380	Закрытые фланцевые; для привода центробежных компрессоров
Двигатели с фазным ротором				
4АНК, 4АК	15—400	750; 1000; 1500	220/380; 380/660	Защищенные (4АНК) или закрытые (4АК); общего назначения
АКП	55—125	1000; 1500	220/380; 380/660	Защищенные; для привода прес-сов, работающих в закрытых помещениях
АКН2(15—19-й габариты)	315—2000	250; 300; 375; 500; 600; 750; 1000	6000	Для привода механизмов с частыми или тяжелыми условиями пуска
МТФ	1,4—30	600; 750; 1000	220/380; 240/415; 400; 500	Защищенные с независимой вентиляцией; для привода крановых механизмов (МТФ) и механизмов металлургического производства (МТН)
МТН	3—118			То же, что АВЗ
АВЗК	400	375	3000/6000	Для привода буровых установок
АКЗ	850	750	6000	Защищенные; для работы в запыленных закрытых помещениях
АКСЗ	315—2000	375; 500	3000/6000	

Таблица 25.2. Номинальные мощности и частоты вращения асинхронных двигателей серий АН-2 и АКН-2 15—19-го габаритов, напряжение 6000 В

Частота вращения, об/мин	Р _{ном} , кВт					Частота вращения, об/мин	Р _{ном} , кВт				
	Габарит						Габарит				
	15	16	17	18*	19*		15	16	17	18*	19*
250*	—	—	—	315 400 500 630	800 1000 1250	500	—	500 630 800	1000 1250 1600 2000	—	
300*	—	—	315* 400*	500 630 800	1000 1250	600	630 800	1000 1250	1600 2000	— —	
375	—	—	315* 400* 500 630	800 1000 1250	1600 2000	750	800 1000	1250 1600 2000	— —	—	
						1000	1000 1250	1600 2000	— —	—	

* Выпускаются только двигатели с фазным ротором (АКН-2).

25.3. ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ
ДВИГАТЕЛИ СЕРИИ 4А
МОЩНОСТЬЮ 0,06—400 кВт

Серия асинхронных двигателей 4А на напряжение до 1000 В в зависимости от рабочих свойств и условий работы двигателей включает основное исполнение и модификации.

Серия 4А охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,06 до 400 кВт (при 1500 об/мин).

Увязка номинальных мощностей с установочными размерами является одной из основных характеристик серии.

Основные технические условия этих двигателей устанавливает ГОСТ 19523-81. В основном исполнении двигатели предназначаются для общего применения в промышленности в условиях умеренного климата (климатическое исполнение У категорий 3 и 4 — по ГОСТ 15150-69). Номинальные значения климатических факторов соответствуют ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70, при этом:

- а) высота над уровнем моря не более 1000 м;
- б) воздушная среда с запыленностью не более:
для двигателей защищенного исполнения — 2 мг/м³;

для двигателей закрытого обдуваемого исполнения — 10 мг/м^3 .

Среда невзрывоопасная, не содержащая агрессивных газов и паров, разрушающих металлы и изоляцию, и токопроводящей пыли.

Двигатели предназначены для работы от сети переменного тока частотой 50 Гц. Они изготавливаются на следующие номинальные напряжения (основное исполнение):

Номинальное напряжение, В	220; 380	220; 380; 660
Мощность, кВт	0,06—0,37	0,55—11,0

Продолжение

Номинальное напряжение, В	220/380; 380/660	380/660
Мощность, кВт	15,0—110	132—400

По заказу потребителя двигатели могут изготавливаться на другие стандартные напряжения.

Номинальные данные двигателей относятся к продолжительному режиму работы S1 (ГОСТ 183-74) при питании от сети 50 Гц. Двигатели модификаций, за исключением многоскоростных двигателей, и двигатели специализированных исполнений изготавливаются на те же напряжения, что и двигатели основного исполнения, на базе которых они спроектированы. Двигатели могут эксплуатироваться при отклонениях напряжения сети от номинального значения в пределах $-5 \div +10 \%$ и отклонениях частоты на $\pm 2,5 \%$ номинального значения. При одновременном отклонении напряжения и частоты сети двигатели должны сохранять номинальную мощность, если сумма абсолютных значений отклонений этих величин не превосходит 10% и каждое из этих отклонений не превышает нормы.

В серии 4А предусмотрены три исполнения по степени защиты (ГОСТ 17494-72):

IP44 для двигателей с высотами оси вращения 50—355 мм (закрытое исполнение);

IP23 для двигателей с высотами оси вращения 160—355 мм (защищенное исполнение);

IP54 для двигателей специализированных исполнений (пылезащищенное исполнение).

Принципиальная конструкция двигателей серии 4А показана на рис. 25.1 (закрытое исполнение) и на рис. 25.2 (защищенное исполнение).

Типоразмеры и основные технические данные двигателей приводятся в табл. 25.3а и 25.3б.

Структура обозначения типов двигателей расшифровывается следующим образом:

4 — порядковый номер серии;

А — наименование вида двигателя — асинхронный;

Н — обозначение двигателей защищенного исполнения; отсутствие знака означает закрытое обдуваемое исполнение;

А — станина и щиты из алюминия; Х — станина алюминиевая; щиты чугунные; отсутствие знаков означает, что станина и щиты чугунные или стальные;

50...355 — высота оси вращения;

S, L, M — установочные размеры по длине станины;

А, В — обозначение длины сердечника (первая длина — А, вторая — В);

2, 4, 6, 8, 10, 12 — число полюсов;

У — климатическое исполнение двигателей;

3 — категория размещения.

Например: 4АА56А2У3 — электродвигатель серии 4, асинхронный, закрытого исполнения, станина и подшипниковые щиты из алюминия, с высотой оси вращения 56 мм, сердечник первой длины, двухполюсный, для районов умеренного климата, третьей категории размещения; 4АН200М4У3 — электродвигатель серии 4, асинхронный, защищенного исполнения, станина и щиты из чугуна, с высотой оси вращения 200 мм, с установочным размером М по длине станины, четырехполюсный, для районов умеренного климата, третьей категории размещения.

Габаритные, установочно-присоединительные размеры и масса двигателей с одним цилиндрическим концом вала для формы исполнения IM1001 по рис. 25.3 соответствуют табл. 25.3в.

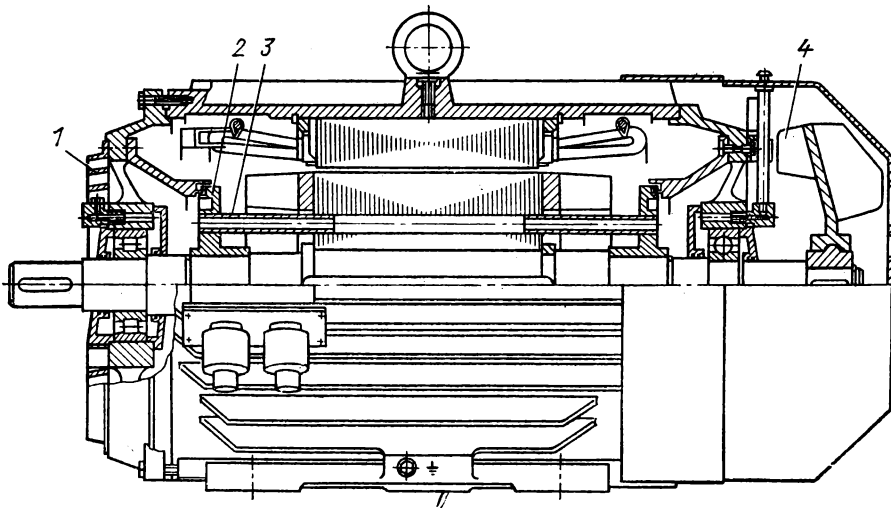


Рис. 25.1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4А280:

1 — жалюзи; 2 — уплотнитель; 3 — трубка; 4 — вентилятор

Т а б л и ц а 25.3а. Технические данные асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А основного исполнения (закрытые обдуваемые)

Тип Двигателя	$P_{\text{ном'}}$ кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	J , кг·м ²
		n , об/мин	η , %	$\cos \varphi_1$					
3000 об/мин (синхр.)									
4AA50A2Y3	0,09	2740	60,0	0,70	2,2	2,0	1,8	4,0	$0,245 \cdot 10^{-4}$
4AA50B2Y3	0,12	2710	63,0	0,70	2,2	2,0	1,8	4,0	$0,268 \cdot 10^{-4}$
4AA56A2Y3	0,18	2800	66,0	0,76	2,2	2,0	1,5	4,0	$4,15 \cdot 10^{-4}$
4AA56B2Y3	0,25	2770	68,0	0,77	2,2	2,0	1,5	4,0	$4,65 \cdot 10^{-4}$
4AA632Y3	0,37	2750	70,0	0,86	2,2	2,0	1,5	4,5	$7,63 \cdot 10^{-4}$
4AA63B2Y3	0,55	2740	73,0	0,86	2,2	2,0	1,5	4,5	$9 \cdot 10^{-4}$
4A71A2Y3	0,75	2840	77,0	0,87	2,2	2,0	1,5	5,5	$9,75 \cdot 10^{-4}$
4A71B2Y3	1,10	2810	77,5	0,87	2,2	2,0	1,5	5,5	$10,5 \cdot 10^{-4}$
4A80A2Y3	1,50	2850	81,0	0,85	2,6	2,1	1,4	6,5	$18,3 \cdot 10^{-4}$
4A80B2Y3	2,20	2850	83,0	0,87	2,6	2,1	1,4	6,5	$21,3 \cdot 10^{-4}$
4A90L2Y3	3,0	2840	84,5	0,88	2,5	2,1	1,6	6,5	$35,3 \cdot 10^{-4}$
4A100S2Y3	4,0	2880	86,5	0,89	2,5	2,0	1,6	7,5	$59,3 \cdot 10^{-4}$
4A100L2Y3	5,5	2880	87,5	0,91	2,5	2,0	1,6	7,5	$75 \cdot 10^{-4}$
4A112M2Y3	7,5	2900	87,5	0,88	2,8	2,0	1,8	7,5	$1,0 \cdot 10^{-2}$
4A132M2Y3	11,0	2900	88,0	0,90	2,8	1,7	1,5	7,5	$2,25 \cdot 10^{-2}$
4A160S2Y3	15,0	2940	88,0	0,91	2,2	1,4	1,0	7,0	$4,75 \cdot 10^{-2}$
4A160M2Y3	18,5	2940	88,5	0,92	2,2	1,4	1,0	7,0	$5,25 \cdot 10^{-2}$
4A180S2Y3	22,0	2940	88,5	0,91	2,5	1,4	1,1	7,5	$7,0 \cdot 10^{-2}$
4A180M2Y3	30,0	2945	90,5	0,90	2,5	1,4	1,1	7,5	$8,5 \cdot 10^{-2}$
4A200M2Y3	37,0	2945	90,0	0,89	2,5	1,4	1,0	7,5	$14,5 \cdot 10^{-2}$
4A200L2Y3	45,0	2945	91,0	0,90	2,5	1,4	1,0	7,5	$16,8 \cdot 10^{-2}$
4A225M2Y3	55,0	2945	91,0	0,92	2,5	1,4	1,2	7,5	$25 \cdot 10^{-2}$
4A250S2Y3	75,0	2960	91,0	0,89	2,5	1,2	1,0	7,5	$46,5 \cdot 10^{-2}$
4A250M2Y3	90,0	2960	92,0	0,90	2,5	1,2	1,0	7,5	$52 \cdot 10^{-2}$
4A280S2Y3	110,0	2970	91,0	0,89	2,2	1,2	1,0	7,0	1,09
4A280M2Y3	132,0	2970	91,5	0,89	2,2	1,2	1,0	7,0	1,19
4A315S2Y3	160,0	2970	92,0	0,90	2,2	1,2	0,9	6,5	1,4
4A315M2Y3	200,0	2970	92,5	0,90	2,2	1,2	0,9	7,0	1,63
4A355S2Y3	250,0	2970	92,5	0,90	1,9	1,0	0,9	7,0	2,85
4A355M2Y3	315,0	2970	93,0	0,91	1,9	1,0	0,9	7,0	3,23
1500 об/мин (синхр.)									
4AA50A4Y3	0,06	1380	50,0	0,60	2,2	2,0	1,7	2,5	$0,29 \cdot 10^{-4}$
4AA50B4Y3	0,09	1370	55,0	0,60	2,2	2,0	1,7	2,5	$0,325 \cdot 10^{-4}$
4AA56A4Y3	0,12	1375	63,0	0,66	2,2	2,1	1,5	3,5	$7,0 \cdot 10^{-4}$
4AA56B4Y3	0,18	1365	64,0	0,64	2,2	2,1	1,5	3,5	$7,88 \cdot 10^{-4}$
4AA63A4Y3	0,25	1380	68,0	0,65	2,2	2,0	1,5	4,0	$12,4 \cdot 10^{-4}$
4AA63B4Y3	0,37	1365	68,0	0,69	2,2	2,0	1,5	4,0	$13 \cdot 10^{-4}$
4A71A4Y3	0,55	1390	70,5	0,70	2,2	2,0	1,8	4,5	$13,8 \cdot 10^{-4}$
4A71B4Y3	0,75	1390	72,0	0,73	2,2	2,0	1,8	4,5	$14,3 \cdot 10^{-4}$
4A80A4Y3	1,10	1420	75,0	0,81	2,2	2,0	1,6	5,0	$32,3 \cdot 10^{-4}$
4A80B4Y3	1,50	1415	77,0	0,83	2,2	2,0	1,6	5,0	$33,3 \cdot 10^{-4}$
4A90L4Y3	2,20	1425	80,0	0,83	2,4	2,1	1,6	6,0	$56 \cdot 10^{-4}$
4A100S4Y3	3,0	1435	82,0	0,83	2,4	2,0	1,6	6,0	$86,8 \cdot 10^{-4}$
4A100L4Y3	4,0	1430	84,0	0,84	2,4	2,0	1,6	6,0	$1,13 \cdot 10^{-2}$
4A112M4Y3	5,50	1445	85,5	0,85	2,2	2,0	1,6	7,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4A132S4Y3	7,5	1455	87,5	0,86	3,0	2,2	1,7	7,5	$2,75 \cdot 10^{-2}$
4A132M4Y3	11,0	1460	87,5	0,87	3,0	2,2	1,7	7,5	$4 \cdot 10^{-2}$
4A160S4Y3	15,0	1465	88,5	0,88	2,3	1,4	1,0	7,0	$10,3 \cdot 10^{-2}$
4A160M4Y3	18,5	1465	89,5	0,88	2,3	1,4	1,0	7,0	$12,8 \cdot 10^{-2}$
4A180S4Y3	22,0	1470	90,0	0,90	2,3	1,4	1,0	6,5	$19 \cdot 10^{-2}$

Продолжение табл. 25.3а

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	J , кг·м ²
		n , об/мин	η , %	$\cos \varphi_1$					
4A180M4Y3	30,0	1470	91,0	0,90	2,3	1,4	1,0	6,5	$23,3 \cdot 10^{-2}$
4A200M4Y3	37,0	1475	91,0	0,90	2,5	1,4	1,0	7,0	$36,8 \cdot 10^{-2}$
4A200L4Y3	45,0	1475	92,0	0,90	2,5	1,4	1,0	7,0	$44,5 \cdot 10^{-2}$
4A225M4Y3	55,0	1480	92,5	0,90	2,5	1,3	1,0	7,0	$64 \cdot 10^{-2}$
4A250S4Y3	75,0	1480	93,0	0,90	2,3	1,2	1,0	7,0	1,02
4A250M4Y3	90,0	1480	93,0	0,91	2,3	1,2	1,0	7,0	1,17
4A280S4Y3	110,0	1470	92,5	0,90	2,0	1,2	1,0	5,5	2,3
4A280M4Y3	132,0	1480	93,0	0,90	2,0	1,3	1,0	5,5	2,48
4A315S4Y3	160,0	1480	93,5	0,91	2,2	1,3	0,9	6,0	3,08
4A315M4Y3	200,0	1480	94,0	0,92	2,2	1,3	0,9	6,0	3,63
4A355S4Y3	250,0	1485	94,5	0,92	2,0	1,2	0,9	7,0	6,0
4A355M4Y3	315,0	1485	94,5	0,92	2,0	1,2	0,9	7,0	7,05
1000 об/мин (синхр.)									
4AA63A6Y3	0,18	885	56,0	0,62	2,2	2,2	1,5	3,0	$17,4 \cdot 10^{-4}$
4AA63B6Y3	0,25	890	59,0	0,62	2,2	2,2	1,5	3,0	$19 \cdot 10^{-4}$
4A71A6Y3	0,37	910	64,5	0,69	2,2	2,0	1,8	4,0	$19,3 \cdot 10^{-4}$
4A71B6Y3	0,55	900	67,5	0,71	2,2	2,0	1,8	4,0	$20,3 \cdot 10^{-4}$
4A80A6Y3	0,75	915	69,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	$46 \cdot 10^{-4}$
4A80B6Y3	1,10	920	74,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	$46,3 \cdot 10^{-4}$
4A90L6Y3	1,50	935	75,0	0,74	2,2	2,0	1,7	4,5	$73,5 \cdot 10^{-4}$
4A100L6Y3	2,20	950	81,0	0,73	2,2	2,0	1,6	5,0	$1,31 \cdot 10^{-2}$
4A112MA6Y3	3,00	955	81,0	0,76	2,5	2,0	1,8	6,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4A112MB6Y3	4,0	950	82,0	0,81	2,5	2,0	1,8	6,0	$2,0 \cdot 10^{-2}$
4A132S6Y3	5,50	965	85,0	0,80	2,5	2,0	1,8	6,5	$4,0 \cdot 10^{-2}$
4A132M6Y3	7,50	970	85,5	0,81	2,5	2,0	1,8	6,5	$5,75 \cdot 10^{-2}$
4A160S6Y3	11,0	975	86,0	0,86	2,0	1,2	1,0	6,0	$13,8 \cdot 10^{-2}$
4A160M6Y3	15,0	975	87,5	0,87	2,0	1,2	1,0	6,0	$18,3 \cdot 10^{-2}$
4A180M6Y3	18,5	975	88,0	0,87	2,0	1,2	1,0	5,0	$22,0 \cdot 10^{-2}$
4A200M6Y3	22,0	975	90,0	0,90	2,4	1,3	1,0	6,5	$40 \cdot 10^{-2}$
4A200L6Y3	30,0	980	90,5	0,90	2,4	1,3	1,0	6,5	$45,3 \cdot 10^{-2}$
4A225M6Y3	37,0	980	91,0	0,89	2,3	1,2	1,0	6,5	$73,8 \cdot 10^{-2}$
4A250S6Y3	45,0	985	91,5	0,89	2,1	1,2	1,0	6,5	1,16
4A250M6Y3	55,0	985	91,5	0,89	2,1	1,2	1,0	6,5	1,26
4A280S6Y3	75,0	985	92,0	0,89	2,2	1,4	1,2	5,5	2,93
4A280M6Y3	90,0	985	92,5	0,89	2,2	1,4	1,2	5,5	3,38
4A315S6Y3	110,0	985	93,0	0,90	2,2	1,4	0,9	6,5	4,0
4A315M6Y3	132,0	985	93,0	0,90	2,2	1,4	0,9	6,5	4,5
4A355S6Y3	160,0	985	93,5	0,90	2,2	1,4	0,9	6,5	7,33
4A355M6Y3	200,0	985	94,0	0,90	2,2	1,4	0,9	6,5	8,8
750 об/мин (синхр.)									
4A71B8Y3	0,25	680	56,0	0,65	1,7	1,6	1,2	3,0	$18,5 \cdot 10^{-4}$
4A80A8Y3	0,37	675	61,5	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5	$33,8 \cdot 10^{-4}$
4A80B8Y3	0,55	700	64,0	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5	$40,5 \cdot 10^{-4}$
4A90LA8Y3	0,75	700	68,0	0,62	1,9	1,6	1,2	3,5	$67,5 \cdot 10^{-4}$
4A90LB8Y3	1,10	700	70,0	0,68	1,9	1,6	1,2	3,5	$86,3 \cdot 10^{-4}$
4A100L8Y3	1,50	700	74,0	0,65	1,9	1,6	1,2	4,0	$1,3 \cdot 10^{-2}$
4A112MA8Y3	2,20	700	76,5	0,71	2,2	1,9	1,4	5,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4A112MB8Y3	3,0	700	79,0	0,74	2,2	1,9	1,4	5,0	$2,5 \cdot 10^{-2}$
4A132S8Y3	4,0	720	83,0	0,70	2,6	1,9	1,4	5,5	$4,25 \cdot 10^{-2}$

Продолжение табл. 25.3а

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	J , кг·м ²
		n , об/мин	η , %	$\cos \varphi_1$					
4A132M8Y3	5,50	720	83,0	0,74	2,6	1,9	1,4	5,5	$5,75 \cdot 10^{-2}$
4A160S8Y3	7,50	730	86,0	0,75	2,2	1,4	1,0	6,0	$13,8 \cdot 10^{-2}$
4A160M8Y3	11,0	730	87,0	0,75	2,2	1,4	1,0	6,0	$18 \cdot 10^{-2}$
4A180M8Y3	15,0	730	87,0	0,82	2,0	1,2	1,0	6,0	$25 \cdot 10^{-2}$
4A200M8Y3	18,5	735	88,5	0,84	2,2	1,2	1,0	5,5	$40 \cdot 10^{-2}$
4A200L8Y3	22,0	730	88,5	0,84	2,0	1,2	1,0	5,5	$45,3 \cdot 10^{-2}$
4A225M8Y3	30,0	735	90,0	0,81	2,1	1,3	1,0	6,0	$73,8 \cdot 10^{-2}$
4A250S8Y3	37,0	735	90,0	0,83	2,0	1,2	1,0	6,0	1,16
4A250M8Y3	45,0	740	91,0	0,84	2,0	1,2	1,0	6,0	1,36
4A280S8Y3	55,0	735	92,0	0,84	2,0	1,2	1,0	5,5	3,18
4A280M8Y3	75,0	735	92,5	0,85	2,0	1,2	1,0	5,5	4,13
4A315S8Y3	90,0	740	93,0	0,85	2,3	1,2	0,9	6,5	4,93
4A315M8Y3	110,0	740	93,0	0,85	2,3	1,2	0,9	6,5	5,85
4A355S8Y3	132,0	740	93,5	0,85	2,2	1,2	0,9	6,5	9,05
4A355M8Y3	160,0	740	93,5	0,85	2,2	1,2	0,9	6,5	10,2
600 об/мин (синхр.)									
4A250S10Y3	30,0	590	88,0	0,81	1,9	1,2	1,0	6,0	1,36
4A250M10Y3	37,0	590	89,0	0,81	1,9	1,2	1,0	6,0	1,61
4A280S10Y3	37,0	590	91,0	0,78	1,8	1,0	1,0	6,0	3,6
4A280M10Y3	45,0	590	91,5	0,78	1,8	1,0	1,0	6,0	3,78
4A315S10Y3	55,0	590	92,0	0,79	1,8	1,0	0,9	6,0	5,25
4A315M10Y3	75,0	590	92,0	0,80	1,8	1,0	0,9	6,0	6,18
4A355S10Y3	90,0	590	92,5	0,83	1,8	1,0	0,9	6,0	9,33
4A355M10Y3	110,0	590	93,0	0,83	1,8	1,0	0,9	6,0	10,9
500 об/мин (синхр.)									
4A315S12Y3	45,0	490	90,5	0,75	1,8	1,0	0,9	6,0	5,25
4A315M12Y3	55,0	490	91,0	0,75	1,8	1,0	0,9	6,0	6,18
4A355S12Y3	75,0	490	91,5	0,76	1,8	1,0	0,9	6,0	9,33
4A355M12Y3	90,0	490	92,0	0,76	1,8	1,0	0,9	6,0	10,9

Таблица 25.3б. Технические данные асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А основного исполнения (защищенные)

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$ кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	J , кг·м ²
		n , об/мин	η , %	$\cos \varphi$					
3000 об/мин (синхр.)									
4AH160S2Y3	22,0	2915	88,0	0,88	2,2	1,3	1,0	7,0	$4,25 \cdot 10^{-2}$
4AH160M2Y3	30,0	2915	90,0	0,91	2,2	1,3	1,0	7,0	$5,5 \cdot 10^{-2}$
4AH180S2Y3	37,0	2945	91,0	0,91	2,2	1,2	1,0	7,0	$8,0 \cdot 10^{-2}$
4AH180M2Y3	45,0	2945	91,0	0,91	2,2	1,3	1,0	7,0	$9,25 \cdot 10^{-2}$
4AH200M2Y3	55,0	2940	91,0	0,90	2,5	1,3	1,0	7,0	$16,0 \cdot 10^{-2}$
4AH200L2Y3	75,0	2940	92,0	0,90	2,5	1,3	1,0	7,0	$19,0 \cdot 10^{-2}$
4AH225M2Y3	90,0	2945	92,0	0,88	2,2	1,2	1,0	7,0	$23,8 \cdot 10^{-2}$
4AH250S2Y3	110,0	2950	93,0	0,86	2,2	1,2	1,0	7,0	$44,3 \cdot 10^{-2}$
4AH250M2Y3	132,0	2945	93,0	0,88	2,2	1,2	1,0	7,0	$49,5 \cdot 10^{-2}$
4AH280S2Y3	160,0	2960	94,0	0,90	2,2	1,2	1,0	6,5	$77,5 \cdot 10^{-2}$
4AH280M2Y3	200,0	2960	94,5	0,90	2,2	1,2	1,0	6,5	1,03
4AH315M2Y3	250,0	2970	94,5	0,91	2,1	1,0	0,9	6,0	1,7
4AH355S2Y3	315,0	2970	94,5	0,92	2,1	1,0	0,9	7,0	2,38
4AH355M2Y3	400,0	2970	95,0	0,92	2,1	1,0	0,9	7,0	2,85

Продолжение табл. 25.35

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{II}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{II}}}{I_{\text{ном}}}$	J , кг·м ²
		n , об/мин	η , %	$\cos \varphi$					
1500 об/мин (синхр.)									
4АН160S4Y3	18,5	1450	88,5	0,87	2,1	1,3	1,0	6,5	$9,25 \cdot 10^{-2}$
4АН160M4Y3	22,0	1458	90,0	0,88	2,1	1,3	1,0	6,5	$11,8 \cdot 10^{-2}$
4АН180S4Y3	30,0	1465	90,0	0,84	2,2	1,2	1,0	6,5	$17,8 \cdot 10^{-2}$
4АН180M4Y3	37,0	1470	90,5	0,89	2,2	1,2	1,0	6,5	$21,8 \cdot 10^{-2}$
4АН200M4Y3	45,0	1475	91,0	0,89	2,5	1,3	1,0	6,5	$34,5 \cdot 10^{-2}$
4АН200L4Y3	55,0	1475	92,0	0,89	2,5	1,3	1,0	6,5	$42,3 \cdot 10^{-2}$
4АН225M4Y3	75,0	1475	92,5	0,89	2,2	1,2	1,0	6,5	$61,8 \cdot 10^{-2}$
4АН250S4Y3	90,0	1480	93,5	0,89	2,2	1,2	1,0	6,5	$88,3 \cdot 10^{-2}$
4АН250M4Y3	110,0	1475	93,5	0,89	2,2	1,2	1,0	6,5	$95,8 \cdot 10^{-2}$
4АН280S4Y3	132,0	1470	93,0	0,89	2,0	1,2	1,0	6,0	1,83
4АН280M4Y3	160,0	1470	93,5	0,90	2,0	1,2	1,0	6,0	2,13
4АН315S4Y3	200,0	1475	94,0	0,91	2,0	1,2	0,9	6,0	3,15
4АН315M4Y3	250,0	1475	94,0	0,91	2,0	1,2	0,9	6,0	3,7
4АН355S4Y3	315,0	1485	94,5	0,91	2,0	1,0	0,9	7,0	5,75
4АН355M4Y3	400,0	1485	94,5	0,91	2,0	1,0	0,9	7,0	7,0
1000 об/мин (синхр.)									
4АН180S6Y3	18,5	975	87,0	0,85	2,0	1,2	1,0	6,0	$18,8 \cdot 10^{-2}$
4АН180M6Y3	22,0	975	88,5	0,87	2,0	1,2	1,0	6,0	$23,5 \cdot 10^{-2}$
4АН200M6Y3	30,0	975	90,0	0,88	2,1	1,3	1,0	6,0	$37,8 \cdot 10^{-2}$
4АН200L6Y3	37,0	980	90,5	0,88	2,1	1,3	1,0	6,5	$43,0 \cdot 10^{-2}$
4АН225M6Y3	45,0	980	91,0	0,87	2,0	1,2	1,0	6,5	$70,3 \cdot 10^{-2}$
4АН250S6Y3	55,0	985	92,5	0,87	2,0	1,2	1,0	6,5	1,09
4АН250M6Y3	75,0	985	93,0	0,87	2,0	1,2	1,0	7,0	1,4
4АН280S6Y3	90,0	980	92,5	0,89	2,0	1,2	1,0	6,0	2,5
4АН280M6Y3	110,0	980	92,5	0,89	2,0	1,2	1,0	6,0	2,88
4АН315S6Y3	132,0	985	93,0	0,89	2,0	1,2	1,0	6,0	4,45
4АН315M6Y3	160,0	985	93,5	0,89	2,0	1,2	1,0	6,0	5,13
4АН355S6Y3	200,0	985	94,0	0,90	2,0	1,2	1,0	6,0	7,8
4АН355M6Y3	250,0	985	94,0	0,90	2,0	1,2	1,0	6,0	9,5
750 об/мин (синхр.)									
4АН180S8Y3	15,0	730	86,0	0,80	1,9	1,2	1,0	5,5	$23,5 \cdot 10^{-2}$
4АН180M8Y3	18,5	730	87,5	0,80	1,9	1,2	1,0	5,5	$29,8 \cdot 10^{-2}$
4АН200M8Y3	22,0	730	89,0	0,84	2,0	1,3	1,0	5,5	$49,0 \cdot 10^{-2}$
4АН200L8Y3	30,0	730	89,5	0,82	2,0	1,3	1,0	5,5	$58,3 \cdot 10^{-2}$
4АН225M8Y3	37,0	735	90,0	0,81	1,9	1,2	1,0	5,5	$82,5 \cdot 10^{-2}$
4АН250S8Y3	45,0	740	91,0	0,81	1,9	1,2	1,0	5,5	1,19
4АН250M8Y3	55,0	735	92,0	0,81	1,9	1,2	1,0	6,0	1,4
4АН280S8Y3	75,0	735	92,0	0,85	1,9	1,2	1,0	5,5	3,0
4АН280M8Y3	90,0	735	92,5	0,86	1,9	1,2	1,0	5,5	3,38
4АН315S8Y3	110,0	735	93,0	0,86	1,9	1,2	1,0	5,5	6,08
4АН315M8Y3	132,0	735	93,0	0,86	1,9	1,2	1,0	5,0	7,0
4АН355S8Y3	160,0	740	93,5	0,86	1,9	1,2	1,0	5,5	9,75
4АН355M8Y3	200,0	740	94,0	0,86	1,9	1,2	1,0	5,5	11,9
600 об/мин (синхр.)									
4АН280S10Y3	45,0	585	90,0	0,81	1,8	1,0	1,0	5,5	3,23
4АН280M10Y3	55,0	585	90,5	0,81	1,8	1,0	1,0	5,5	3,75
4АН315S10Y3	75,0	590	91,0	0,82	1,8	1,0	0,9	5,5	5,63
4АН315M10Y3	90,0	590	91,5	0,82	1,8	1,0	0,9	5,5	6,63
4АН355S10Y3	110,0	590	92,0	0,83	1,8	1,0	0,9	5,5	9,68
4АН355M10Y3	132,0	590	92,5	0,83	1,8	1,0	0,9	5,5	11,0
500 об/мин (синхр.)									
4АН315S12Y3	55,0	490	90,5	0,78	1,8	1,0	0,9	5,5	5,63
4АН315M12Y3	75,0	490	91,0	0,78	1,8	1,0	0,9	5,5	6,63
4АН355S12Y3	90,0	490	91,5	0,77	1,8	1,0	0,9	5,5	9,68
4АН355M12Y3	110,0	490	92,0	0,77	1,8	1,0	0,9	5,5	11,0

Т а б л и ц а 25.3в. Основные размеры и масса электродвигателей серии 4А основного исполнения

Тип двигателя	Число полюсов	Габаритные размеры, мм			Установочно-присоединительные размеры, мм								Масса, кг	Оптовая цена за один двигатель, руб.
		l_{30}	h_{31}	d_{30}	l_1	l_{10}	l_{s1}	d_1	d_{10}	b_{10}	h			
4AA50	2, 4	174	142	104	20	63	32	9	5,8	80	50	3,3	19,5	
4AA56A, 4AA56B	2, 4	194	152	120	23	71	36	11	5,8	90	56	4,5	—	
4AA63A, 4AA63B	2, 4, 6	216	162	130	30	80	40	14	7	100	63	6,3	24	
4A71A, 4A71B	2, 4, 6, 8	285	203	170	40	90	45	19	7	112	71	15,1	25	
4A80A	2, 4, 6, 8	300	218	186	50	100	50	22	10	125	80	17,4	34	
4A80B	2, 4, 6, 8	320	218	185	50	100	50	22	10	125	80	20,4	36	
4A90L	2, 4, 6, 8	350	243	208	50	125	56	24	10	140	90	28,7	42	
4A100S	2, 4	362	263	235	60	112	63	28	12	160	100	36,0	45	
4A100L	2, 4, 6, 8	392	263	235	60	140	63	28	12	160	100	42,0	68	
4A112M	2, 4, 6, 8	452	310	265	80	140	70	32	12	190	112	56,0	84	
4A132S	4, 6, 8	480	350	302	80	140	89	38	12	216	132	77,0	113	
4A132M	2, 4, 6, 8	530	350	302	80	178	89	38	12	216	132	93,0	125	
4A160S	2	624	430	358	110	178	108	42	15	254	160	130,0	170	
4A160M	4, 6, 8	624	430	358	110	178	108	48	15	254	160	135,0	170	
4A180S	2	667	430	358	110	210	108	42	15	254	160	145,0	195	
4A180M	4, 6, 8	667	430	358	110	210	108	48	15	254	160	160,0	195	
4A180S	2	662	470	410	110	203	121	48	15	279	180	165	230	
4A180M	4	662	470	410	110	203	121	55	15	279	180	175	230	
4A180M	2	702	470	410	110	241	121	48	15	279	180	185	270	
4A200M	4, 6, 8	702	470	410	110	241	121	55	15	279	180	195	270	
4A200M	2	760	535	450	110	267	133	55	19	318	200	255	325	
4A200L	4, 6, 8	790	535	450	140	267	133	60	19	318	200	270	325	
4A200L	2	800	535	450	110	305	133	55	19	318	200	280	375	
4A200L	4, 6, 8	830	535	450	140	305	133	60	19	318	200	310	375	
4A225M	2	810	575	494	110	311	149	55	19	356	225	355	390	
4A250S	4, 6, 8	840	575	494	140	311	149	65	19	356	225	375	390	
4A250S	2	915	640	554	140	311	168	65	24	406	250	470	525	
4A250M	4, 6, 8, 10	915	640	554	140	311	168	75	24	406	250	490	525	
4A250M	2	955	640	554	140	349	168	65	24	406	250	510	610	
4AH160S	4, 6, 8, 10	955	640	554	140	349	168	75	24	406	250	535	610	
4AH160S	2	533	430	332	110	178	108	42	15	254	160	110	180	
4AH160M	4	533	430	332	110	178	108	48	15	254	160	115	180	
4AH160M	2	588	430	332	110	210	108	42	15	254	160	130	235	
4AH160M	4	588	430	332	110	210	108	48	15	254	160	135	205	
4AH180S	2	580	470	385	110	203	121	48	15	279	180	170	250	
4AH180S	4, 6, 8	580	470	385	110	203	121	55	15	279	180	170	250	
4AH180M	2	620	470	385	110	241	121	48	15	279	180	185	300	
4AH200M	4, 6, 8	620	470	385	110	241	121	48	15	279	180	190	300	
4AH200M	2	665	535	460	110	267	133	55	19	318	200	265	332	
4AH200L	4, 6, 8	695	535	460	140	267	133	60	19	318	200	260	332	
4AH200L	2	705	535	460	110	305	133	55	19	318	200	295	383	
4AH225M	4, 6, 8	735	535	460	140	305	133	60	19	318	200	315	383	
4AH225M	2	715	580	500	110	311	149	55	19	356	225	355	398	
4AH250S	4, 6, 8	745	580	500	140	311	149	65	19	356	225	355	398	
4AH250S	2	805	640	550	140	311	168	65	24	406	250	465	525	
4AH250M	4, 6, 8	805	640	550	140	311	168	75	24	406	250	445	525	
4AH250M	2	845	640	550	140	349	168	65	24	406	250	505	610	
4AH250M	4, 6, 8	845	640	550	140	349	168	75	24	406	250	495	610	
4A280S	2	1140	700	660	140	368	190	70	24	457	280	810	1150	
4A280M	4, 6, 8, 10	1170	700	660	170	368	190	80	24	457	280	810	1150	
4A280M	2	1180	700	660	140	419	190	70	24	457	280	870	1270	
4A315S	4, 6, 8, 10	1210	700	660	170	419	190	80	24	457	280	870	1270	
4A315S	2	1235	765	710	140	406	216	75	28	508	315	1005	1470	
4A315M	4, 6, 8, 10, 12	1265	765	710	170	406	216	90	28	508	315	1005	1470	
4A315M	2	1285	765	710	140	457	216	75	28	508	315	1130	1650	
4A355S	4, 6, 8, 10, 12	1315	765	710	170	457	216	90	28	508	315	1130	1650	
4A355S	2	1350	855	794	170	500	254	85	28	610	355	1420	1980	
4A355M	4, 6, 8, 10, 12	1390	855	794	210	500	254	100	28	610	355	1420	1980	
4A355M	2	1410	855	794	170	560	254	85	28	610	355	1670	2140	
4A355M	4, 6, 8, 10, 12	1450	855	794	210	560	254	100	28	610	355	1670	2140	
4AH280S	2	935	575	660	140	368	190	70	24	457	280	715	—	
4AH280M	4, 6, 8, 10	965	575	660	170	368	190	80	24	457	280	715	—	
4AH280M	2	975	575	660	140	419	190	70	24	457	280	825	—	
4AH315S	4, 6, 8, 10	1005	575	660	170	419	190	80	24	457	280	825	—	
4AH315M	4, 6, 8, 10, 12	1000	650	730	170	406	216	90	28	508	315	860	—	
4AH315M	2	1020	650	730	140	457	216	75	28	508	315	940	—	
4AH355S	4, 6, 8, 10, 12	1050	650	730	170	457	216	90	28	508	315	940	—	
4AH355S	2	1165	710	810	170	500	254	85	28	610	355	1200	—	
4AH355M	4, 6, 8, 10, 12	1205	710	810	210	500	254	100	28	610	355	1200	—	
4AH355M	2	1225	710	810	170	560	254	85	28	610	355	1350	1600	
4AH355M	4, 6, 8, 10, 12	1265	710	810	210	560	254	100	28	610	355	1350	—	

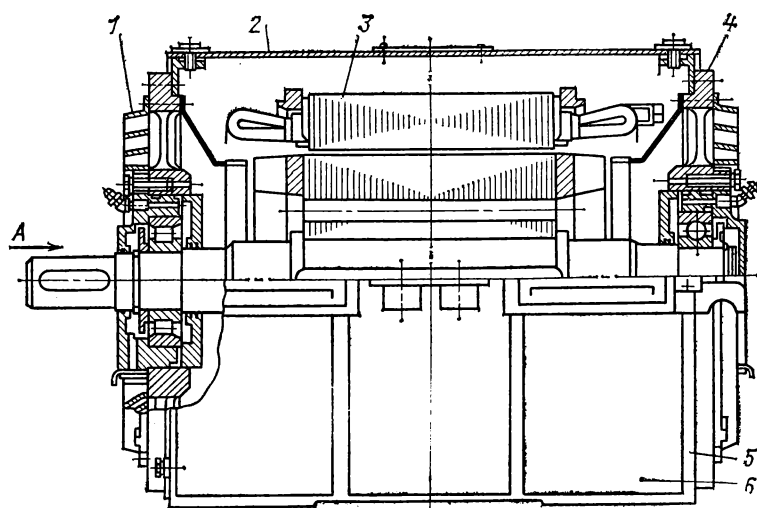


Рис. 25.2. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4АН280:

1 — торцевые жалюзи; 2 — кожух; 3 — сердечник статора; 4 — щит подшипниковый; 5 — стойка; 6 — полустанина; 7 — боковые жалюзи

Вид А

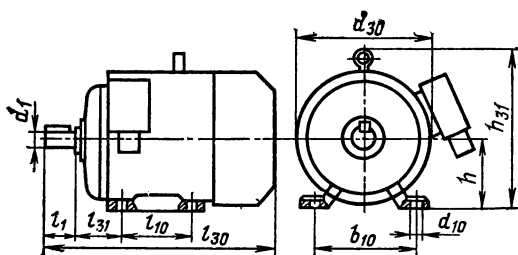
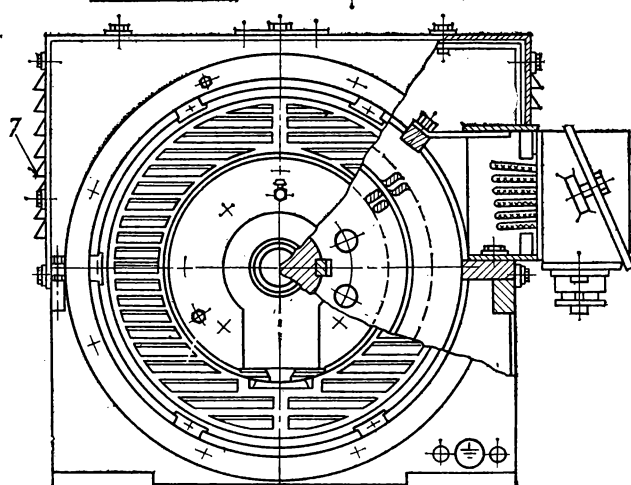


Рис. 25.3. Электродвигатель серии 4А (габаритные размеры)

Изоляция двигателей по классам нагревостойкости (ГОСТ 8865-70, см. § 23.10) выполняется для двигателей с высотами оси вращения 50—132 мм класса В, 160—355 мм класса F.

Вводное устройство в двигателях с высотами оси вращения 56—250 мм располагается сверху станины, в двигателях с высотами оси вращения 280—355 мм — с правой стороны, если смотреть на двигатель со стороны выведенного конца вала (рис. 25.3).

25.4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А

Для приводов со специальными характеристиками, предназначенных для работы в различных условиях окружающей среды, в двигателях серии 4А предусмотрен большой ряд модификаций. Технические данные всех исполнений двигателей серии 4А подробно представлены в [25.1]. Условно все специализированные исполнения двигателей серии 4А можно разделить на четыре группы.

Электрические модификации двигателей: с повышенным пусковым моментом, повышенным скольжением, многоскоростные, однофазные, питающиеся от сети 60 Гц.

Двигатели с повышенным пусковым моментом выполняются на базе двигателей основного исполнения (высота оси вращения 160—250 мм). От двигателей основного исполнения они отличаются только формой паза ротора (двойная клетка, залитая алюминием) и в некоторых типоразмерах числом витков обмотки статора.

Шкала мощностей и увязка ее с установочными размерами такие же, как у двигателей

основного исполнения соответствующих типов размеров. Распределение мощностей в зависимости от частоты вращения следующее:

Синхронная частота вращения, об/мин	Мощность, кВт
1500	15—90
1000	11—55
750	7,5—45

Кратность вращающих моментов двигателей

Синхронная частота вращения, об/мин	Кратность пускового	момента максимального	минимального
1500	2,0	2,2	1,6
1000	2,0	2,1	1,6
750	1,8	2,0	1,5

Кратность пускового тока для всех двигателей не превышает 7,5. Конструктивно двигатели выполняются только в закрытом обдуваемом исполнении (степень защиты IP44).

Двигатели с повышенным скольжением предназначены для работы в приводах с частыми пусками и для разгона больших маховых масс. От двигателей основного исполнения они отличаются уменьшенными размерами пазов ротора и материалом, которым заливается ротор. Исполнение двигателей — закрытое обдуваемое (степень защиты IP44). Номинальный режим работы двигателей повторно-кратковременный (S3, см. § 23.8) с продолжительностью включения ПВ=40 %. За номинальную мощность принимается наибольшая допустимая мощность при ПВ=40 %. Двигатели могут работать также и при ПВ=15, 25, 60, 100 %. Мощность двигателей при ПВ=40 % в зависимости от высоты оси вращения и частоты вращения приведена в табл. 25.4.

Многоскоростные двигатели предназначены для работы в приводах, требующих ступенчатого регулирования частоты вращения. Такие двигатели имеют на статоре либо несколько обычных выполненных на разные числа полю-

Таблица 25.4. Мощности двигателей серии 4А с повышенным скольжением

Номинальная мощность при ПВ=40 %, кВт	Высота оси вращения, мм	Синхронная частота вращения, об/мин
1—11	71—132	3000
0,60—63	71—250	1500
0,4—45	71—250	1000
0,3—36	71—250	750

сов, либо одну или две полюсно-переключаемые обмотки.

Схема полюсно-переключаемой обмотки получается наиболее простой при изменении p в отношении 2 : 1 (рис. 25.4).

Шаг обмотки выбирается таким, чтобы при меньшем числе полюсов ($2p_1$) он был равен $y=0,5\tau_1$.

Каждая фаза обмотки делится на две одинаковые части, имеющие по p_1 катушечных групп; катушечные группы каждой части взаимно смещены на $2\tau_1$ (на рис. 25.4, а и в, показана только фаза А). При соединении обмотки на меньшее число полюсов ($2p_1$) каждая фаза имеет две параллельные ветви, а соседние катушечные группы обеих частей обмотки обтекаются током в противоположных направлениях, сопряжение фаз — двойная звезда (YY) (рис. 25.4, в и г). При соединении обмотки на большее число полюсов ($2p_2=4p_1$) каждая фаза имеет одну параллельную ветвь, а соседние катушечные группы обеих частей обмотки обтекаются током в одном направлении (рис. 25.4, а). При большем числе полюсов ($2p_2$) фазы обмотки могут соединяться либо в треугольник (рис. 25.4, б), если момент двигателя должен оставаться постоянным при изменении чисел полюсов обмотки ($M=\text{const}$), либо в звезду, если при большей частоте вращения момент должен возрасти ($M=\text{var}$). Число выводных концов обмотки — 6.

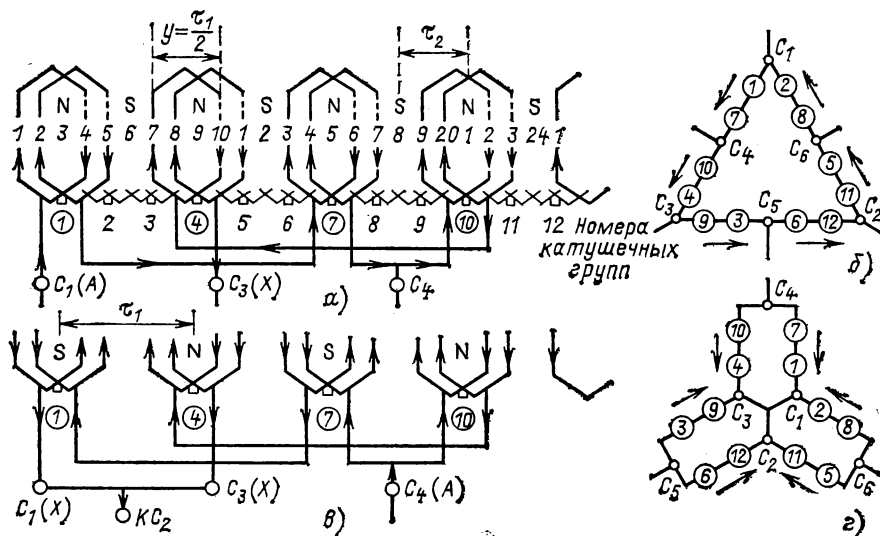


Рис. 25.4. Схемы двухслойной полюсно-переключаемой обмотки на четыре и восемь полюсов ($Z=24$, $2p_1=4$, $a_1=2$, $y=3$, $2p_2=8$):

а — схема соединений катушек обмотки при $2p_2=8$; б — схема включения частей фаз обмотки при $2p_2=8$; в, г — то же при $2p_1=4$

Симметричные обмотки с переключением на три или четыре скорости или даже на две скорости, но с отношением чисел полюсов, отличающимся от 2:1 и 3:2, имеют значительно большее число выводных концов (табл. 25.5) и требуют более сложной аппаратуры управления. Описание таких обмоток имеется в [23.15, 24.14, 24.25]. При отношении чисел полюсов 4:3 и т. п. зачастую располагают на статоре две отдельные обмотки на разные числа полюсов. Одна или обе обмотки могут быть полюсно-переключаемыми; тогда двигатель получается соответственно трех- или четырехскоростным.

Сочетания частоты вращения, чисел полюсов и высоты оси вращения, предусмотренные в серии 4А, приведены в табл. 25.6. Кратность максимального момента для двигателей с высотой оси вращения 56—63 мм не менее 1,7, для остальных не менее 1,8. Многоскоростные двигатели выполняются только в закрытом исполнении.

Таблица 25.5. Число выводных концов обмоток многоскоростных асинхронных двигателей

Число обмоток на статоре	Число синхронных частот вращения	Число выводных концов
Одна обмотка с переключением	2	6
	3	12—18
	4	18—21
Две нормальные обмотки (каждая на одну частоту вращения)	2	6
Две обмотки, одна из которых переключается на две частоты вращения	3	9
Две обмотки (обе с переключением на две синхронные частоты вращения)	4	12

Двигатели, питающиеся от сети 60 Гц, конструктивно соответствуют той модификации или специализированному исполнению, на базе которой они выполняются и могут отличаться

Таблица 25.6. Частоты вращения, числа полюсов, высоты осей вращения и мощности многоскоростных двигателей серии 4А

Синхронная частота вращения, об/мин	Число полюсов	Высота оси вращения, мм	Номинальная мощность, кВт
1500/3000	4/2	56—250	0,1—71
1000/1500	6/4	90—200	1,3—22
750/1500	8/4	90—250	0,63—55
750/1000	8/6	100—250	0,7—55
500/1000	12/6	180—250	6,7—35,5
1000/1500/3000	6/4/2	100—160	1,0—10,5
750/1500/3000	8/4/2	100—160	0,63—9,5
750/1000/1500	8/6/4	100—250	0,71—37
750/1000/1500/3000	8/6/4/2	100	0,5—1,4
500/750/1000/1500	12/8/6/4	160—250	1,8—30

только числом витков обмотки статора. В этом исполнении может быть изготовлен любой двигатель всего ряда модификаций и специализированных исполнений, предусмотренных в серии. Двигатели 60 Гц выполняются только в экспортном исполнении.

Однофазные двигатели имеют высоту оси вращения 56—71 мм и выполняются с пусковым резистором, с пусковым конденсатором, с рабочим конденсатором, с пусковым и рабочим конденсаторами на частоту вращения 3000 и 1500 об/мин. Двигатели выполняют на базе двигателей основного исполнения, за исключением обмотки статора, размеров и числа пазов ротора и панели зажимов. Двигатели с рабочим и пусковым конденсаторами снабжаются устройством для автоматического отключения пускового конденсатора, а двигатели с пусковым резистором и пусковым конденсатором — устройством для автоматического отключения вспомогательной обмотки.

Специализированные исполнения по конструкции: с фазным ротором, со встроенным электромагнитным тормозом, встроенной температурной защитой, встраиваемые, с повышенной точностью по установочным размерам, малощумные, высокоточные.

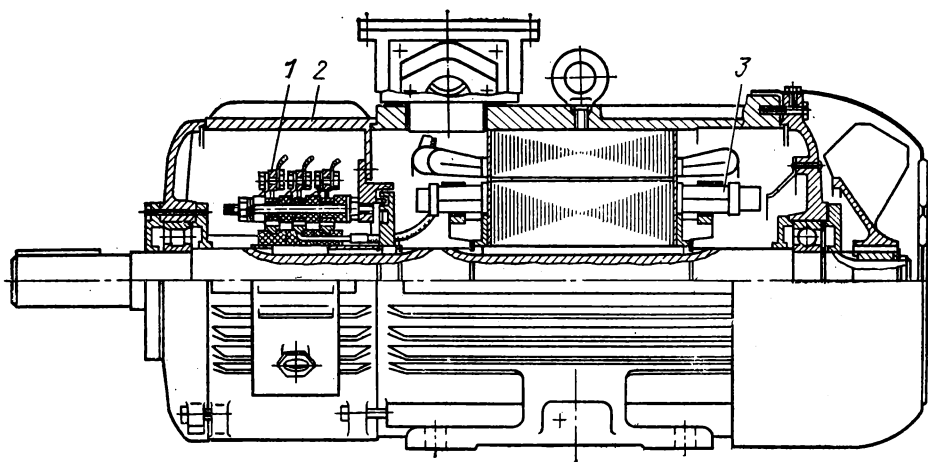


Рис. 25.5. Асинхронный двигатель с фазным ротором 4AK250:

1 — контактные кольца; 2 — станина; 3 — обмотка ротора

Таблица 25.7а. Мощности двигателей серии 4А с фазным ротором (степень защиты IP23)

Высота оси вращения, мм	Установочный размер по длине	Мощность, кВт, при частоте вращения, об/мин				
		1500	1000	750	600	500
160	S	14	—	—	—	—
	M	17	—	—	—	—
180	S	22	13	11,0	—	—
	M	30	18,5	14,0	—	—
200	M	37	22	18,5	—	—
	L	45	30	22	—	—
225	M	55	37	30	—	—
250	SA	75	45	37	—	—
	SB	90	55	45	—	—
	M	110	75	55	—	—
280	S	132	90	75	45	—
	M	160	110	90	55	—
315	S	200	132	110	75	55
	M	250	160	132	90	75
355	S	315	200	160	110	90
	M	400	250	200	132	110

Двигатели с фазным ротором (рис. 25.5) имеют высоты оси вращения 160—335 мм (степень защиты IP23) и 160—250 мм (степень защиты IP44). Мощность двигателей в соответствии с высотой оси вращения и синхронной частотой вращения приведена в табл. 25.7а и 25.7б.

Двигатели со встроенным электромагнитным тормозом применяются в различных производственных механизмах с целью сокращения непроизводительного рабочего времени и повышения точности технологических операций. Их используют в станкостроении, на агрегатных и автоматических линиях, в строительных и транспортных машинах и т. д. Двигатели работают в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками (S4 см. § 23.8) под нагрузкой и должны обеспечивать не менее 120 пусков в час при ПВ=40 %. Тормозные двигатели серии 4А имеют высоту оси вращения 56—160 мм.

На высотах осей вращения 56—100 мм двигатели выполняются со встроенным электромагнитным тормозом постоянного тока, а на больших высотах — самотормозящимися с электромагнитной вставкой на роторе. Шкала мощностей двигателей при ПВ=40 % полностью соответствует мощности двигателей основного исполнения (при ПВ=100 %). Установочно-присоединительные размеры такие же, как у двигателей основного исполнения.

Таблица 25.7б. Мощности двигателей серии 4А с фазным ротором (степень защиты IP44)

Высота оси вращения, мм	Установочный размер по длине	Мощность, кВт, при частоте вращения, об/мин		
		1500	1000	750
160	S	11	7,5	5,5
	M	14	10	7,1
180	M	18,5	13	11
200	M	22	18,5	15
	L	30	22	18,5
225	M	37	30	22
250	SA	45	—	—
	SB	55	—	—
	S	—	37	30
	M	71	45	37

Двигатели со встроенной температурной защитой охватывают весь диапазон осей вращения от 56 до 355 мм. Их выпускают как в основном, так и в любом модифицированном, специализированном и узкоспециализированном исполнении. Для тепловой защиты двигателей применяют терморезисторы с большим положительным температурным коэффициентом сопротивления в заданном интервале температур. Терморезисторы встраивают в обмотку статора и выводят на специальные выводы панели зажимов двигателя.

Встраиваемые двигатели, предназначенные для непосредственного встраивания в механизм, имеют высоты оси вращения от 56 до 250 мм. Их выполняют как на базе основного исполнения, так и на базе всех электрических модификаций двигателей. Конструктивно встраиваемые двигатели представляют собой сердечник статора с обмоткой и залитый алюминием (или сплавом на основе алюминия) сердечник ротора. Для подсоединения к питающей сети двигатели выполняют с удлиненными выводными проводами (до 500 мм).

Малошумные, высокоточные двигатели и двигатели повышенной точности по установочным размерам применяются в станкостроении.

Двигатели повышенной точности по установочным размерам имеют высоту оси вращения от 56 до 250 мм и не отличаются от двигателей основного исполнения ни по конструктивным признакам, ни по уровню электромагнитных нагрузок.

К двигателям малошумным и высокоточным предъявляются одинаковые требования по уровню шума (III класс по ГОСТ 16372-84) и по вибростойкости. Отличаются только требования по точности установочных размеров. Для достижения требуемых уровней виброакустических характеристик приняты специальные конструктивные и технологические решения: балансировка ротора по I классу (ГОСТ 12327-79), вентиляторы выполнены пластмассовыми, в двигателях с высотой оси вращения 160 мм снижены электромагнитные нагрузки и обмотка статора выполнена двухслойной вместо однослойной.

Специализированные исполнения по условиям окружающей среды: влагоморозостойкие, химически стойкие, тропические, для Крайнего Севера, судов гражданского флота, сельского хозяйства.

В узкоспециализированные исполнения включен ряд специализированных исполнений, разрабатываемых по отдельным техническим заданиям.

25.5. ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ СЕРИИ АИ

Разработана серия асинхронных двигателей АИ, более экономичная по сравнению с 4А. В серии предусмотрено применение новых материалов, имеют место новые конструктивные решения, что позволило улучшить энергетические, пусковые и виброшумовые характеристики машин и повысить их надежность.

В табл. 25.8 приводятся основные технические данные двигателей серий АИ и 4А с высотой оси вращения 180 мм.

Таблица 25.8. Основные технические данные двигателей серии АИ и 4А с высотой оси вращения 180 мм

Тип	$P_{\text{ном}}$ кВт	КПД, %	$\cos \varphi$	$\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\Pi}}{I_{\text{ном}}}$	Уровень шу- ма, дБ (А)	Общая мас- са, кг	Масса обм. медн, кг	Масса алю- миния, кг	Масса маг- нитопровода, кг	Масса сталь- ного проката, кг	Масса чу- гунного литья, кг
АИ180S2	22	90,0	0,88	1,6	1,4	7,5	79	160	14,2	2,9	59,2	19,6	55,2
4А180S2	22	88,5	0,91	1,4	1,1	7,5	89	165	14,4	4,2	61,9	20,6	63,5
АИ180M2	30	91,0	0,89	1,6	1,4	7,5	79	180	14,9	3,2	78,6	21,2	61,8
4А180M2	30	90,5	0,90	1,4	1,1	7,5	89	185	14,9	4,7	84,6	21,8	67,6
АИ180S4	22	90,5	0,87	1,7	1,5	7,0	73	170	13,3	5,1	73,9	20,1	55,2
4А180S4	22	90,0	0,90	1,4	1,0	6,5	83	175	13,6	6,0	81,6	21,8	63,5
АИ180M4	30	91,5	0,87	1,7	1,5	7,0	73	190	14,9	6,0	98,6	21,6	61,8
4А180M4	30	91,0	0,90	1,4	1,0	6,5	83	195	15,1	7,0	105,7	22,4	67,6
АИ180M6	18,5	88,5	0,86	1,6	1,4	6,0	68	180	11,5	6,1	88,7	21,6	61,8
4А180M6	18,5	88,0	0,87	1,2	1,0	5,5	78	195	12,6	6,0	81,6	22,4	67,6
АИ180M8	15	88,0	0,8	1,5	1,3	5,5	64	180	11,5	7,0	96,1	21,6	61,8
4А180M8	15	87,0	0,82	1,2	1,0	6,0	74	195	12,0	6,7	95,6	22,4	67,6

Таблица 25.9. Технические данные двигателей серии АИ и модернизированных двигателей серии 4А (АМ)

Тип	$P_{\text{ном}}$ кВт	D_a	D	l_1	Тип	$P_{\text{ном}}$ кВт	D_a	D	l_1
АИР160S2 АИР160M2	15 18,5	260	140	120 145	4АМ160S2 4АМ160M2	15 18,5	27,2	155	110 130
АИР160S4 АИР160M4	15 18,5		163	150 180	4АМ160S4 4АМ160M4	15 18,5		185	140 180
АИР160S6 АИР160M6	11 15		180	150 210	4АМ160S6 4АМ160M6	11 15		197	145 200
АИР160S8 АИР160M8	7,5 11		180	150 210	4АМ160S8 4АМ160M8	7,5 11		197	145 200
АИ180S2 АИ180M2	22 30	295	155	120 160	4АМ180S2 4АМ180M2	22 30	313	171	110 145
АИ180S4 АИ180M4	22 30		190	150 200	4АМ180S4 4АМ180M4	22 30		211	145 185
АИ180M6 АИ180M8	18,5 15		210	180 195	4АМ180M6 4АМ180M8	18,5 15		210	145 170
АИ200M2 АИ200L2	37 45	327	178	145 170	4АМ200M2 4АМ200L2	37 45	349	194	130 160
АИ200M4 АИ200L4	37 45		208	195 235	4АМ200M4 4АМ200L4	37 45		238	170 215
АИ200M6 АИ200L6	22 30		236	175 210	4АМ200M6 4АМ200L6	22 30		250	160 185
АИ200M8 АИ200L8	18,5 22		236	175 210	4АМ200M8 4АМ200L8	18,5 22		250	160 185
АИ225M2 АИ225M4	55 55	368	195 235	195 220	4АМ225M2 4АМ225M4	55 55	392	208 264	182 202
АИ225M6 АИ225M8	37 30		258 258	190 200	4АМ225M6 4АМ225M8	37 30		284 284	177 177
АИ250S2 АИ250M2	75 90	420	218	185 210	4АМ250S4 4АМ250M4	75 90	437	232	202 232
АИ250S4 АИ250M4	75 90		273	225 250	4АМ250S4 4АМ250M4	75 90		290	222 263
АИ250S6 АИ250M6	45 55		297	170 210	4АМ250S6 4АМ250M6	45 55		317	182 202
АИ250S8 АИ250M8	37 45		297	190 215	4АМ250S8 4АМ250M8	37 45		317	182 222

Т а б л и ц а 25.10. Технические данные двигателей серии АИ

Тип Двигателя	$P_{\text{ном}}$ кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	$J, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
		n , об/мин	КПД, %	$\cos \varphi$					
АИР71А2 АИР71В2	0,75 1,10	3000 3000	78,5 79,0	0,83 0,83	2,2	2,1 2,1	1,6	6,0	
АИР80А2 АИР80В2 АИР90Л2	1,50 2,20 3,00	3000 3000 3000	81,0 83,0 84,5	0,85 0,87 0,88		2,1 2,0 2,0		7,0	
АИР100S2 АИР100Л2	4,00 5,50	3000 3000	87,0 88,0	0,88 0,89		2,0 2,0		7,5	
АИР71А4	0,55	1500	70,5	0,70		2,3	1,8	5,0	
АИР71В4	0,75	1500	73,0	0,73		2,2	1,6		
АИР80А4 АИР80В4	1,10 1,50	1500 1500	75,0 78,0	0,81 0,83		2,2 2,2		5,5	
АИР90Л4	2,20	1500	81,0	0,83		2,1		6,5	
АИР100S4 АИР100Л4	3,00 4,00	1500 1500	82,0 85,0	0,83 0,84		2,0 2,0		7,0	
АИР71А6 АИР71В6 АИР80А6 АИР80В6	0,37 0,55 0,75 1,10	1000 1000 1000 1000	65,0 68,5 70,0 74,0	0,66 0,70 0,72 0,74		2,0		4,5	
АИР90Л6 АИР100Л6	1,50 2,20	1000 1000	76,0 81,0	0,72 0,74			6,0		
АИР80А2-ОМ2; АИР80А2Б-ОМ2	1,50	3000	81,0	0,85	2,2	2,0	1,2	7,0	$0,731 \cdot 10^{-2}$
АИР80В2-ОМ2; АИР80В2Б-ОМ2	2,20	3000	83,0	0,87	2,2	2,0	1,2	7,0	$0,854 \cdot 10^{-2}$
АИР80А4-ОМ2; АИР80А4Б-ОМ2	1,10	1500	75,0	0,81	2,2	2,0	1,6	5,5	$1,293 \cdot 10^{-2}$
АИР80В4-ОМ2; АИР80В4Б-ОМ2	1,50	1500	78,0	0,83	2,2	2,0	1,6	5,5	$1,335 \cdot 10^{-2}$
АИР80А6-ОМ2; АИР80А6Б-ОМ2	0,75	1000	70,0	0,72	2,2	2,0	1,6	4,5	$1,347 \cdot 10^{-2}$
АИР80В6-ОМ2; АИР80В6Б-ОМ2	1,10	1000	74,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,5	$1,838 \cdot 10^{-2}$
АИИ90SА2 АИИ90SВ2 АИИ90SВ4 АИИ90SВ6 АИИ100S6 АИИ112S4 АИИ112S6 АИР112М2У3; АИРХ112М2У3 АИР112М4У3; АИРХ112М4У3 АИР112МА6У3; АИРХ112МА6У3 АИР112МВ6У3; АИРХ112МВ6У3 АИР112МА8У3; АИРХ112МА8У3 АИР112МВ8У3; АИРХ112МВ8У3 АИР132М2У3; АИРХ132М2У3 АИР132S4У3; АИРХ132S4У3 АИР132М4У3; АИРХ132М4У3	0,75 1,10 0,75 0,55 0,75 2,20 1,10 7,50 5,50 3,00 4,00 2,20 3,00 11,0 7,50 11,0	3000 3000 1500 1000 1000 1500 1000 3000 1500 1000 1000 750 3000 3000 1500 1500	77,0 79,0 78,0 76,0 78,0 84,5 82,0 87,5 85,5 81,0 82,0 76,5 79,0 88,0 87,5 87,5	0,80 0,82 0,80 0,68 0,73 0,84 0,76 0,88 0,86 0,76 0,81 0,71 0,74 0,90 0,86 0,87	3,0 3,0 2,5 2,5 2,5 2,5 2,5 2,2 2,2 2,2 2,2 2,2 2,2 2,2 2,2 2,2	2,0 2,0 2,0 2,0 2,0 2,0 2,0 2,0 2,0 2,0 2,0 1,8 1,8 1,6 2,0 2,0 2,0	1,2 1,2 1,2 1,2 1,2 1,2 1,2 1,6 1,6 1,6 1,6 1,4 1,4 1,2 1,6 1,6 1,6	7,5 7,5 7,5 4,8 5,0 7,5 6,6 7,5 7,0 6,0 6,0 6,0 6,0 7,5 7,5 7,5	—

Продолжение табл. 25.10

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$ кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	J , кг · м ²
		n , об/мин	КПД, %	cos φ					
АИР132S6У3; АИРХ132S6У3	5,50	1000	85,0	0,80	2,2	2,0	1,6	7,0	—
АИР132М6У3; АИРХ132М6У3	7,50	1000	85,5	0,81	2,2	2,0	1,6	7,0	
АИР132S8У3; АИРХ132S8У3	4,00	750	83,0	0,70	2,2	1,8	1,4	6,0	
АИР132М8У3; АИРХ132М8У3	5,50	750	83,0	0,74	2,2	1,8	1,4	6,0	
АИ280S4У3	110,0	1500	93,5	0,91	2,2	1,6	1,0	6,5	
АИ280М4У3	132,0	1500	94,0	0,93	2,4	1,6	1,0	6,5	
АИ280S6У3	75,0	1000	92,5	0,90	2,2	1,3	1,0	6,5	
АИ280М6У3	90,0	1000	93,0	0,90	2,4	1,4	1,0	6,5	
АИ280S8У3	55,0	750	92,0	0,86	2,2	1,3	1,0	6,0	
АИ230М8У3	75,0	750	93,0	0,87	2,2	1,4	1,0	6,0	
АИ280S10У3	37,0	600	91,0	0,79	2,3	1,3	0,9	6,0	
АИ280М10У3	45,0	600	91,5	0,79	2,1	1,4	0,9	6,0	
АИ315S4У3	160,0	1500	93,5	0,91	2,0	1,4	1,0	5,5	
АИ315М4У3	200,0	1500	94,0	0,92	2,0	1,4	0,9	5,5	
АИ315S6У3	110,0	1000	93,0	0,92	2,3	1,4	1,0	6,0	
АИ315М6У3	132,0	1000	93,5	0,90	2,3	1,4	1,0	6,5	
АИ315S8У3	90,0	750	93,0	0,85	2,2	1,2	1,0	6,0	
АИ315М8У3	110,0	750	93,0	0,86	2,2	1,1	0,9	6,0	
АИ315S10У3	55,0	600	92,0	0,83	2,3	1,4	0,9	6,5	
АИ315М10У3	75,0	600	92,0	0,83	2,3	1,3	0,9	6,0	
АИ315S12У3	45,0	500	90,5	0,75	1,8	1,1	0,9	6,0	
АИ315М12У3	55,0	500	91,0	0,75	1,8	1,1	0,9	6,0	
АИ355S4У3	250,0	1500	94,5	0,92	2,0	1,4	0,9	7,0	
АИ355М4У3	315,0	1500	94,5	0,92	2,0	1,4	0,9	7,0	
АИ355S6У3	160,0	1000	94,0	0,90	2,0	1,6	1,0	7,0	
АТ355М6У3	200,0	1000	94,5	0,90	2,0	1,6	0,9	7,0	
АИ355S8У3	132,0	750	93,5	0,85	2,0	1,2	0,9	6,5	
АИ355М8У3	160,0	750	93,5	0,85	2,0	1,2	0,9	6,5	
АИ355S10У3	90,0	600	92,5	0,83	1,9	1,1	0,9	6,0	
АИ355М10У3	110,0	600	93,0	0,83	1,9	1,1	0,9	6,0	
АИ355S12У3	75,0	500	91,5	0,76	1,9	1,1	0,9	6,0	
АИ355М12У3	90,0	500	92,0	0,76	1,9	1,1	0,9	6,0	

Таблица 25.11. Основные размеры и масса электродвигателей серии АИ (см. рис. 25.3)

Тип двигателя	Число полюсов	Габаритные размеры, мм			Установочно-присоединительные размеры, мм							Масса, кг
		l_{80}	h_{81}	d_{80}	l_1	l_{10}	l_{21}	d_1	d_{10}	b_{10}	h	
АИР71А АИР71В	2, 4, 6	272,5	188	170	40	90	45	19	10	112	71	8,6/10,5 9,4/10,8
АИР80А АИР80В	2, 4, 6	296,5 320,5	204,5	190	50	100	50	22	12	125	80	11,9/13,8 13,8/15,7
АИР90	2, 4, 6	337	224,5	210	50	125	56	24	12	140	90	18,6/20,2
АИР100S АИР100L	2, 4, 6	360 391	246,5	240	60	112 140	63	28	16	160	100	23,0/27,9 29,0/33,4
АИР80А-ОМ2 АИР80В-ОМ2	2, 4, 6	296,5 320,5	193	190	50	100	50	22	12	125	80	12,8 14,7
АИИ90SА АИИ90SВ	2, 4, 6	309 333	228	—	50	100	56	22	10	140	90	15,0 17,4
АИИ100S		360	253			112	63	24	12	160	100	22,5
АИИ112S		400	265			60	114	70		190	112	33,2
АИР112М	2, 4, 6, 8	430	285	240	80	140	70	32	12	190	112	49

Продолжение табл. 25.11

Тип двигателя	Число полюсов	Габаритные размеры, мм			Установочно-присоединительные размеры, мм							Масса, кг
		l_{30}	h_{31}	d_{30}	l_1	l_{10}	l_{31}	d_1	d_{10}	b_{10}	h	
АИР132S АИР132М	2, 4, 6, 8	460 498	325	288	80	140 178	89	38	12	216	132	74.5 88
АИ280S	4	1385	690 (КЗ-2)	560	170	368	190	80	24	457	280	695
АИ280М	4	1445				419						760 645
АИ280S	6	1385	850 (КЗ-3)	560	170	368	190	80	24	457	280	700
АИ280М	6	1445				419						650
АИ280S	8	1385				368						735
АИ280М	8	1445				419						605 660
АИ315S	4	1315	910	630	170	406	216	90	28	508	315	900
АИ315М	4	1385				457						1000
АИ315S	6	1315				406						850
АИ315М	6	1385				457						950
АИ315S	8	1315	825 (КЗ-2)	710	210	406	254	100	28	610	355	935
АИ315М	8	1385				457						990
АИ315S	10, 12	1315				406						785
АИ315М	10, 12	1385				457						865
АИ355S	4	1450	985 (КЗ-3)	710	210	500	254	100	28	610	355	1260
АИ355М	4	1480				560						1460
АИ355S	6	1450				500						1130
АИ355М	6	1480				560						1280
АИ355S	8	1450	985 (КЗ-3)	710	210	500	254	100	28	610	355	1170
АИ355М	8	1480				560						1270
АИ355S	10, 12	1450				500						1080
АИ355М	10, 12	1480				560						1190

Двигатели АИ в ряде случаев имеют меньший пусковой ток, что повышает добротность пуска и удешевляет пусковую аппаратуру. Они имеют высокую надежность: у них вероятность безотказной работы равна 0,9 за 20 тыс. ч по сравнению с 0,8 за ту же наработку в серии 4А.

Для сохранения технического уровня выпускаемых двигателей в 1982—1983 гг. проведена модернизация серии 4А. В модернизированных двигателях частично реализованы технические решения, полученные для машин АИ, что позволило снизить уровень шума на 5 дБ (А) и несколько повысить пусковые моменты. Технические данные ряда двигателей серии АИ и модернизированных двигателей серии 4А (АМ) приводятся в табл. 25.9.

В табл. 25.10 и 25.11 приводятся технические данные, основные размеры и массы ряда электродвигателей серии АИ.

25.6. КРАНОВЫЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Крановые электродвигатели серий МТФ и МТКФ предназначены для привода крановых механизмов общепромышленного назначения, а также других агрегатов, работа которых характеризуется кратковременным и повторно-кратковременным режимами и большими кратностями перегрузок.

Металлургические электродвигатели серий МТН и МТКН предназначены для приводов ме-

таллургического производства, а также для других приводов, работающих при повышенных температурах, окружающей среды.

Основным номинальным режимом работы электродвигателей является повторно-кратковременный с ПВ=40 % (см. § 23.8).

Электродвигатели серий МТКФ и МТКН изготавливаются с короткозамкнутым ротором повышенного скольжения и рассчитаны на непосредственный пуск при полном напряжении сети. Электродвигатели МТФ и МТН изготавливаются с фазным ротором.

Электродвигатели серий МТФ, МТКФ, МТН, МТКН характеризуются повышенной перегрузочной способностью, большими пусковыми моментами при сравнительно небольших пусковых токах. Кратность пусковых и максимальных моментов по отношению к номинальному находится в пределах 2,3—3,2.

Крановые двигатели имеют класс нагревостойкости F, металлургические — H.

По размерам внешнего диаметра статора двигатели МТФ и МТН имеют восемь габаритов (с нулевого по седьмой), а двигатели МТКФ и МТКН — шесть (с нулевого по пятый).

Цифровая часть обозначения двигателей расшифровывается следующим образом: первая цифра (0—7) трехзначного числа — габарит, вторая — порядковый номер серии, третья — условная длина, цифра после тире — число полюсов. Например, МТКФ112-6 — крановый электродвигатель с короткозамкнутым ротором первого габарита, второй длины, шестиполюсный.

Т а б л и ц а 25.12. Технические данные крановых электродвигателей серии МТКФ с короткозамкнутым ротором 50 Гц, 220/380, 500 В

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт, при ПВ=40 %	Частота вращения, об/мин	$\cos \varphi$	КПД, %	Максимальный момент, Н·м	Пусковой момент, Н·м	Пусковой ток при 380 В, А	J , кг·м ²	Масса двигателя, кг	Максимальная частота вращения, об/мин	Оптовая цена за один двигатель, руб.
МТКФ011-6	1,4	875	0,66	61,5	42	42	15	0,02	47	2500	75
МТКФ012-6	2,2	880	0,69	67	67	67	22	0,0275	53	2500	80
МТКФ111-6	3,5	885	0,79	72	105	104	35	0,045	70	2500	82
МТКФ112-6	5	895	0,74	74	175	175	53	0,065	80	2500	85
МТКФ211-6	7,5	880	0,77	75,5	220	210	78	0,11	110	2500	116
МТКФ311-6	11	910	0,76	77,5	390	380	130	0,213	155	2500	133
МТКФ312-6	15	930	0,78	81	600	590	205	0,3	195	2500	160
МТКФ411-6	22	935	0,79	82,5	780	720	275	0,475	255	2500	190
МТКФ412-6	30	935	0,78	73,5	1000	950	380	0,638	315	2500	232
МТКФ311-8	7,5	690	0,71	73,5	330	320	95	0,275	155	1900	133
МТКФ312-8	11	700	0,74	78	510	470	150	0,388	195	1900	160
МТКФ411-8	15	695	0,71	80	670	650	185	0,538	255	1900	190
МТКФ412-8	22	700	0,69	80,5	1000	950	295	0,75	315	1900	232

Т а б л и ц а 25.13. Технические данные крановых электродвигателей серии МТФ с фазным ротором 50 Гц, 220/380 и 500 В

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт, при ПВ=40 %	Частота вращения, об/мин	$\cos \varphi$	КПД, %	Максимальный момент, Н·м	J , кг·м ²	Масса двигателя, кг	Максимальная частота вращения, об/мин	Оптовая цена за один двигатель, руб.
МТФ011-6	1,4	885	0,65	61,5	40	0,0213	51	2500	95
МТФ012-6	2,2	890	0,68	64	57	0,0288	58	2500	100
МТФ111-6	3,5	895	0,73	70	87	0,0488	76	2500	104
МТФ112-6	5	930	0,7	75	140	0,0675	88	2500	107
МТФ211-6	7,5	930	0,7	77	195	0,115	120	2500	142
МТФ311-6	11	945	0,69	79	320	0,225	170	2500	173
МТФ312-6	15	955	0,73	82	480	0,313	210	2500	200
МТФ411-6	22	965	0,73	83,5	650	0,5	280	2500	240
МТФ412-6	30	970	0,71	85,5	950	0,675	345	2500	290
МТФ311-8	7,5	695	0,68	73	270	0,275	170	1900	173
МТФ312-8	11	705	0,71	77	430	0,388	210	1900	200
МТФ411-8	15	710	0,67	81	580	0,538	280	1900	240
МТФ412-8	22	720	0,63	82	900	0,75	345	1900	290

Т а б л и ц а 25.14. Технические данные металлургических электродвигателей серии МТКН с короткозамкнутым ротором 50 Гц, 220/380, 240/415, 400 и 500 В

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт, при ПВ=40 %	Частота вращения, об/мин	$\cos \varphi$	КПД, %	Максимальный момент, Н·м	Пусковой момент, Н·м	Пусковой ток при 380 В, А	J , кг·м ²	Масса двигателя, кг	Максимальная частота вращения, об/мин	Оптовая цена за один двигатель, руб.
МТКН111-6	3	910	0,7	68	99	98	32	0,045	70	2500	68
МТКН112-6	4,5	900	0,75	71,5	158	157	50	0,065	80	2500	78
МТКН211-6	7	895	0,7	73	230	220	88	0,11	110	2500	135
МТКН311-6	11	910	0,76	77,5	390	380	130	0,213	155	2500	143
МТКН312-6	15	930	0,78	81	600	590	205	0,3	195	2500	170
МТКН411-6	22	935	0,79	82,5	780	720	275	0,475	255	2500	206
МТКН412-6	30	935	0,78	83,5	1000	950	380	0,638	315	2500	265
МТКН311-8	7,5	690	0,71	73,5	330	320	95	0,275	155	1900	143
МТКН312-8	11	700	0,74	78	510	470	150	0,388	195	1900	170
МТКН411-8	15	695	0,71	80	670	650	185	0,538	255	1900	206
МТКН412-8	22	700	0,69	80,5	1000	950	295	0,75	315	1900	265
МТКН511-8	28	695	0,77	83	1150	1150	336	1,075	440	1900	397
МТКН512-8	37	695	0,78	83	1500	1420	460	1,425	540	1900	510

Т а б л и ц а 25.15. Технические данные металлургических электродвигателей серии МТН с фазным ротором 50 Гц, 220/380, 240/415, 400 и 500 В

Тип электродвигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт, при ПВ=40 %	Частота вращения, об/мин	$\cos \varphi$	КПД, %	Максимальный момент, Н·м	J , кг·м ²	Масса двигателя, кг	Максимальная частота вращения, об/мин	Оптовая цена за один двигатель, руб.
МТН111-6	3	895	0,67	65	85	0,0488	76	2500	107
МТН112-6	4,5	910	0,71	69	120	0,0675	88	2500	114
МТН1211-6	7	920	0,64	73	200	0,115	120	2500	175
МТН311-6	11	940	0,69	78	320	0,225	170	2500	198

Продолжение табл. 25.15

Тип электродвигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт, при ПВ=40 %	Частота вращения, об/мин	$\cos \varphi$	КПД, %	Максимальный момент, Н·м	J , кг·м ²	Масса двигателя, кг	Максимальная частота вращения, об/мин	Оптовая цена за один двигатель, руб.
МТН312-6	15	950	0,73	81	480	0,313	210	2500	237
МТН411-6	22	960	0,73	82,5	650	0,5	280	2500	294
МТН412-6	30	965	0,71	84,5	950	0,675	345	2500	347
МТН512-6	55	960	0,79	88	1660	1,018	—	2500	—
МТН611-6	75	950	0,85	87	2560	3,275	—	2500	—
МТН612-6	95	960	0,85	88	3650	4,125	—	2500	—
МТН613-6	118	965	0,84	90	4750	5,1	—	2500	—
МТН311-8	7,5	690	0,68	71,5	270	0,275	170	1900	198
МТН312-8	11	700	0,69	78	430	0,313	210	1900	237
МТН411-8	15	705	0,67	79	580	0,538	280	1900	294
МТН412-8	22	715	0,63	80,5	900	0,75	345	1900	347
МТН511-8	28	705	0,72	83	1020	1,075	470	1900	516
МТН512-8	37	705	0,74	85	1400	1,425	570	1900	622
МТН611-10	45	570	0,72	84	2360	4,25	900	1500	840
МТН612-10	60	565	0,78	320	3200	5,25	1070	1500	1030
МТН613-10	75	575	0,72	88	4200	6,25	1240	1500	1230
МТН711-10	100	584	0,69	89,5	4650	10,25	1550	1500	1830
МТН712-10	125	585	0,7	90,3	5800	12,75	1700	1500	1950
МТН713-10	160	586	0,68	91	7450	15,0	1900	1500	2160

Крановые и металлургические двигатели серий МТФ, МТН, МТКФ и МТКН изготавливаются на частоту 50 Гц и напряжения 380/220 и 500 В, а для экспортного исполнения — также на 50 Гц, 400 и 415/240 В и на 60 Гц, 380/220 и 440 В.

По своим техническим данным двигатели соответствуют ГОСТ 185-70.

Технические данные крановых и металлургических электродвигателей в повторно-кратковременном режиме работы с ПВ=40 % приведены в табл. 25.12—25.15.

Технические данные, соответствующие другим режимам работы, а также габаритные размеры двигателей приводятся в каталоге на эти двигатели [25.16].

25.7. АСИНХРОННЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

Общие сведения

Силовые асинхронные микродвигатели общепромышленного широкого применения по своей конструкции, свойствам, характеристикам, по тем требованиям, которые к ним предъявляются (высокие КПД и $\cos \varphi$, невысокая стоимость и т. п.), практически не отличаются от асинхронных двигателей средней и большой мощности.

У большинства из них обычная для асинхронных двигателей механическая характеристика, обеспечивающая устойчивую работу лишь в узком диапазоне частот вращения $[n = (0,8 \div 0,85)n_c]$.

По типу роторов асинхронные микродвигатели делятся на двигатели с короткозамкнутым ротором, имеющим обмотку, выполненную в виде беличьей клетки, и двигатели с массивным или полым ферромагнитными роторами. Микродвигатели с фазными роторами ввиду их сложности и наличия скользящих контактов не выпускаются.

Наибольшее применение получили двигатели с ротором, имеющим короткозамкнутую обмотку в виде беличьей клетки, которая выполняется путем заливки пакетов стали сплавами алюминия. По своим свойствам эти двига-

тели аналогичны двигателям средней и большой мощности. Регулирование частоты вращения асинхронных микродвигателей производится сравнительно редко. В случае необходимости это осуществляется либо путем изменения напряжения или частоты питания, либо путем изменения числа пар полюсов ($n_c = 60f/p$) — в специальных многоскоростных двигателях.

В тех случаях, когда необходимо иметь мягкую механическую характеристику или регулировать частоту вращения в широких пределах путем изменения напряжения, а также в случае необходимости высоких частот вращения применяются асинхронные двигатели с массивным или полым ферромагнитными роторами.

Номинальные частоты вращения зависят от числа пар полюсов и частоты питающей сети. Двигатели на промышленную частоту 50 Гц чаще рассчитываются на синхронные частоты вращения 3000, 1500 об/мин, реже — на 1000 об/мин и менее. Двигатели на повышенные частоты питания (400, 500, 1000 Гц) часто рассчитываются на синхронные частоты вращения от 5000 до 12 000 об/мин и более, хотя некоторые из них также имеют частоты вращения, не превышающие 3000 об/мин.

Номинальные мощности асинхронных микродвигателей весьма различны — от долей ватта до 600 Вт. ГОСТ предусматривается нижеследующая шкала мощностей: 5; 10; 18; 30; 50; 80; 120; 180; 270; 400; 600 Вт.

Напряжение питания микродвигателей чаще всего стандартное: 127, 220, 380 В, хотя иногда для специальных схем выпускаются двигатели на нестандартные напряжения.

Исполнения асинхронных микродвигателей бывают различными. Одни из них имеют закрытое исполнение, другие — защищенное, третьи — открытое, четвертые выпускаются встраиваемыми — не имеют корпуса и подшипниковых щитов. Одни двигатели крепятся посредством лап, другие имеют фланцевое крепление.

Так как микродвигатели чаще работают при сравнительно больших частотах вращения (1000 об/мин и более), то, как правило, они имеют самовентиляцию — охлаждаются рас-

Таблица 25.16. Основные технические данные трехфазных асинхронных электродвигателей закрытого обдуваемого исполнения серии АОЛ. Частота 50 Гц

Тип двигателя	Номинальные данные					η , %	$\cos \varphi$	$\frac{I_{\Pi}}{I_{\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$	Масса, кг, при форме использования		Момент инер- ции ротора, 10^{-3} кг·м ²	Оптовая це- на, руб.
	$P_{\text{НОМ}}$, Вт	$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	$I_{\text{НОМ}}$, А, при $U_{\text{НОМ}}$, В								Щ2/Ф3	Ф3		
			127	220	380									
АОЛ1011-4	50	1390	0,85	0,49	0,28	43	0,62	3	1,3	1,7	3,0	2,9	12	—
АОЛ1012-4	80	1390	1,10	0,62	0,36	52	0,65	3	1,3	1,7	3,5	3,4	14	—
АОЛ111-4	120	1400	1,35	0,78	0,45	58	0,72	4	1,8	2,0	4,7	4,5	22	10,8
АОЛ12-4	180	1400	1,8	1,04	0,6	62	0,74	4	1,8	2,0	5,6	5,4	26	12,1
АОЛ21-4	270	1400	2,48	1,43	0,83	66	0,75	4	1,8	2,0	7,3	7,0	52	12,8
АОЛ22-4	400	1400	3,41	1,97	1,14	70	0,76	4	1,8	2,0	8,9	8,6	64	13,8
АОЛ1011-2	80	2760	0,75	0,43	0,25	58	0,84	4	1,3	1,7	3,1	3,0	12	—
АОЛ1012-2	120	2760	1,00	0,59	0,34	64	0,84	4	1,3	1,7	3,6	3,5	14	—
АОЛ111-2	180	2800	1,5	0,86	0,5	66	0,85	5	2,0	2,2	4,9	4,7	22	—
АОЛ12-2	270	2800	2,08	1,2	0,69	69	0,85	5	2,0	2,2	5,7	5,5	26	—
АОЛ21-2	400	2800	2,95	1,7	0,98	72	0,85	5	2,0	2,2	7,6	7,3	52	—
АОЛ22-2	600	2800	4,3	2,48	1,43	75	0,85	5	2,0	2,2	9,2	8,9	64	—

Примечание. Электродвигатели АОЛ выпускаются на напряжения 127/220 В или 220/380 В.

Таблица 25.17. Основные технические данные трехфазных асинхронных электродвигателей повышенной надежности серии АПН. Частота 50 Гц

Тип двигателя	$P_{\text{НОМ}}$, Вт	При номинальной нагрузке					$\frac{I_{\Pi}}{I_{\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$	Масса, кг	Оптовая це- на, руб.
		$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	$I_{\text{НОМ}}$, А, при $U_{\text{НОМ}}$, В		η , %	$\cos \varphi$					
			220	330							
АПН011-2	80	2750	0,5	0,29	56	0,75	4	1,3	1,7	4,0	43
АПН012-2	120	2750	0,78	0,45	58	0,75	4,5	1,5	1,7	4,3	—
АПН011-4	50	1390	0,55	0,32	42	0,58	3	1,3	1,7	3,9	—
АПН11-2	180	2790	1,3	0,75	60	0,75	5	1	2	5,5	—
АПН12-2	270	2800	1,5	0,87	66	0,75	4,5	2	2	6,3	—
АПН21-2	400	2830	2,15	1,24	70	0,75	5	2	2,2	9,0	—

Примечание. Энергетические показатели η и $\cos \varphi$ даны ориентировочно.

Таблица 25.18. Основные технические данные трехфазных асинхронных электродвигателей серии АВ

Тип двигателя	$P_{\text{НОМ}}$, Вт	$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	$I_{\text{НОМ}}$, А, при $U_{\text{НОМ}}$, В			η , %	$\cos \varphi$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{I_{\Pi}}{I_{\text{НОМ}}}$	Масса, кг, при форме испольнения		Момент инер- ции ротора, 10^{-3} кг·м ²	Оптовая це- на, руб.	
			127	220	380						Щ2Р	Ф3			
3000 об/мин (синхр.)															
AB041-2	30	2700	0,36	0,21	0,12	58	0,66	1,5	1,5	4,0	1,5	1,4	0,125	12,1	
AB042-2	50	2700	0,50	0,29	0,17	64	0,72	1,7	1,5	4,0	1,90	1,75	0,16	—	
AB051-2	80	2700	0,83	0,48	0,28	61	0,72	1,7	1,5	4,0	2,6	2,30	0,36	—	
AB052-2	120	2700	1,03	0,60	0,35	67	0,78	1,7	1,7	4,5	2,9	2,70	0,47	—	
AB061-2	180	2800	1,3	0,75	0,43	75	0,85	2,0	1,7	5,5	4,4	4,1	0,82	—	
AB062-2	270	2800	1,9	1,10	0,62	77	0,86	2,0	2,0	6,0	5,3	4,9	0,11	—	
AB071-2	400	2800	2,7	1,55	0,90	78	0,87	2,2	2,0	6,5	6,9	6,4	3,1	—	
AB072-2	600	2800	4,1	2,35	1,35	78	0,87	2,2	2,0	6,5	8,4	7,9	3,8	—	
1500 об/мин (синхр.)															
AB041-4	18	1300	0,43	0,25	0,15	34	0,56	1,5	1,3	3,0	1,5	1,4	0,125	—	
AB042-4	30	1300	0,50	0,29	0,17	43	0,64	1,5	1,5	3,0	1,90	1,75	0,16	—	
AB051-4	50	1300	0,69	0,40	0,23	51	0,65	1,7	1,5	3,0	2,60	2,30	0,36	—	
AB052-4	80	1300	0,97	0,56	0,32	57	0,66	1,7	1,6	3,0	2,9	2,7	0,47	—	
AB061-4	120	1400	1,17	0,68	0,40	67	0,70	2,0	1,6	4,5	4,4	4,10	1,35	—	
AB062-4	180	1400	1,60	0,93	0,54	71	0,72	2,0	1,6	4,5	5,3	4,9	1,85	—	
AB071-4	270	1400	2,30	1,30	0,75	73	0,74	2,0	1,6	5,0	6,9	6,4	5,7	—	
AB072-4	400	1400	3,30	1,90	1,10	74	0,76	2,0	1,6	5,0	8,4	7,9	7,2	14,8	

Таблица 25.19. Основные технические данные асинхронных маломощных электродвигателей с внешним короткозамкнутым ротором типа АДВ

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$\eta, \%$	$I_{\text{ном}}, \text{А},$ при $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$	$I_{\text{ном}}, \text{А},$ при $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$ и $\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	Средний уровень шума, дБ·А	Размеры, мм		Масса, кг
								d	l	
АДВ-051-4	6	1370	38	0,08	0,046	2,8	35	76	104	1,1
АДВ-052-4	10	1370	40	0,12	0,07	2,3	35	76	115	1,3
АДВ-061-4	16	1370	50	0,145	0,084	2,2	38	86	115	1,6
АДВ-062-4	25	1380	50	0,234	0,135	2,3	38	86	125	1,9

Таблица 25.20. Основные технические данные трехфазных асинхронных электродвигателей закрытого исполнения серии ДАТ. Номинальное напряжение 200 или 220 В. Частота 400 Гц. Условия эксплуатации: температура окружающей среды от -60 до $+100^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха до 98 % при $+40^\circ\text{C}$ и пониженном атмосферном давлении. Режим работы длительный

Тип	$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	Масса, кг	Размеры (диаметр $\times$ длина), мм
ДАТ-10-12	10	1,6	10 800	0,15	32 $\times$ 55
ДАТ-25-12	25	1,6	10 600	0,35	40 $\times$ 84
ДАТ-60-12	60	1,4	11 600	0,65	50 $\times$ 92
ДАТ-100-8	100	1,4	7500	1,0	60 $\times$ 122
ДАТ-250-8	250	1,4	7600	2,2	80 $\times$ 152
ДАТ-400-8	400	1,4	7650	3,8	100 $\times$ 178
ДАТ-600-6	600	1,4	5660	7,60	120 $\times$ 204
ДАТ-1000-6	1000	1,43	5600	12,5	160 $\times$ 193

положенными на валу вентиляторами за счет внутреннего или наружного обдува.

По числу фаз питающей сети асинхронные микродвигатели можно разделить на трехфазные, однофазные и универсальные — способные работать как от трехфазной, так и от однофазной сети.

В промышленности наибольшее применение находят трехфазные микродвигатели, в быту — однофазные.

Трехфазные асинхронные микродвигатели

По устройству и характеристикам подавляющее большинство трехфазных асинхронных микродвигателей не отличается от асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором средней и большей мощности. Их отличительной особенностью являются несколько худшие энергетические показатели — КПД и $\cos \phi$, что объясняется меньшими габаритами и номинальной мощностью.

В СССР выпускается несколько серий трехфазных асинхронных микродвигателей как на промышленную частоту 50 Гц, так и на повышенные частоты.

Наиболее массовыми являются асинхронные микродвигатели, входящие в единую серию асинхронных двигателей СССР — серию 4А. Это двигатели с высотами осей вращения 50, 56 и 63 мм. Основные технические данные этих двигателей представлены в табл. 25.3а.

Наряду с микродвигателями серии 4А в настоящее время еще выпускаются, хотя и в значительно меньших количествах, трехфазные микродвигатели серии АОЛ (табл. 25.16) и аналогичные им микродвигатели повышенной надежности серии АПН (табл. 25.17).

Весьма широкое применение находят в настоящее время трехфазные асинхронные микродвигатели

серии АВ (табл. 25.18), выпускаемые в больших количествах.

В последние годы разработаны и серийно выпускаются маломощные асинхронные микродвигатели типа АДВ с внешним короткозамкнутым ротором для привода вентиляторов холодильных агрегатов, предназначенные для продолжительного режима работы от трехфазной сети переменного тока с частотой 50 и 60 Гц, напряжением 220/380 В и допускающие работу от однофазной сети с напряжением 220 В при включении по схеме Штейнметца. Применение в двигателе изоляций класса нагревостойкости В допускает превышение температуры до 75°C .

Основные параметры, габаритные размеры и масса двигателей приведены в табл. 25.19.

Выпускаются также асинхронные микродвигатели, рассчитанные на работу от сетей с частотой 400 Гц, серии ДАТ (табл. 25.20).

25.8. ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

Общие сведения

Однофазными двигателями на практике обычно называют двигатели, питающиеся от однофазных сетей переменного тока. С точки зрения устройства такие двигатели, за очень редким исключением, не являются однофазными — они имеют на статоре не одну обмотку — фазу, а две, а в некоторых случаях и три, т. е. однофазные с точки зрения питающей сети двигатели по своему устройству являются либо двухфазными, либо даже трехфазными.

Необходимость расположения на статоре нескольких сдвинутых в пространстве обмоток диктуется тем, что двигатель с одной обмоткой

на статоре (чисто однофазный по устройству) не создает при пуске (при $n=0$) вращающего момента и не запускается.

Объясняется это тем, что однофазная обмотка статора создает не вращающееся, а пульсирующее магнитное поле, которое не может самостоятельно увлечь ротор — заставить его вращаться в том или ином направлении.

Однако если ротор силой извне раскрутить в каком-либо направлении, то он будет продолжать вращаться в этом направлении, развивая вполне определенный момент (рис. 25,6, б). Последнее легко объяснить, если пульсирующее поле представить в виде суммы двух вращающихся в разных направлениях полей с амплитудами, равными половине амплитуды пульсирующего поля (рис. 25,6, а).

При вращении ротора вращающий момент M' от прямого поля, вращающегося в ту же сторону, что и ротор (рис. 25,6, б), будет больше, чем момент M'' от обратного поля, вращающегося в обратную сторону. Этим и объясняется наличие вращающегося момента у чисто однофазного двигателя при вращении его ротора, а также у трехфазного двигателя при обрыве одной его фазы в процессе работы двигателя (при вращении его ротора).

Для получения вращающегося магнитного поля необходимо иметь минимум две сдвинутые в пространстве обмотки, обтекаемые токами, сдвинутыми по фазе во времени. В общем случае такая система (обмоток и токов) создает магнитное поле, которое, вращаясь в пространстве, изменяется по величине. Такое поле называется эллиптическим, так как конец вектора поля при его вращении описывает эллипс. Любое эллиптическое поле можно разложить на два вращающихся в разные стороны поля — прямое и обратное. Вращающий момент от обратного поля противодействует моменту от

прямого поля (рис. 25,6, б) и тем самым ухудшает пусковые и рабочие свойства машины, поэтому его всегда стремятся уменьшить путем сведения к нулю или к минимуму. При полном уничтожении обратного поля в машине остается только прямое поле, конец вектора которого описывает при вращении окружность. Такое поле принято называть круговым.

Для получения кругового вращающегося поля в машине с двумя обмотками, сдвинутыми в пространстве на произвольный угол θ , необходимо, чтобы МДС обмоток ($F_A \sim I_A \omega_A$ и $F_B \sim I_B \omega_B$) были равны и сдвинуты во времени на угол β , дополняющий пространственный электрический угол θ до 180° :

$$F_A = F_B = F_\phi; \quad \beta = 180^\circ - \theta.$$

Суммарная МДС обмоток, определяющая амплитуду кругового вращающегося поля, при этом равняется амплитуде МДС фазы $F_{\phi m}$, умноженной на синус угла пространственного сдвига обмоток θ :

$$F_\Sigma = F_{\phi m} \sin \theta.$$

Максимальное круговое поле при заданных токах в обмотках (заданных МДС) получается в случае, когда обмотки сдвинуты в пространстве на электрический угол 90° . Для получения максимального кругового поля необходимо, чтобы при этом токи в обмотках были сдвинуты во времени на четверть периода ($\beta = 90^\circ$). При этих условиях двигатель будет развивать максимальный вращающий момент, как при пуске в ход, так и при работе:

$$M \sim F_{Am} F_{Bm} \sin \theta \sin \beta.$$

Для получения сдвига токов в обмотках по фазе при питании машин от однофазной сети последовательно (или параллельно) с обмотками или с одной из них включаются фазосдвигающие элементы: конденсаторы, реакторы или резисторы. Наилучшее поле и наилучшие свойства двигателя получаются в случае применения в качестве фазосдвигающего элемента конденсатора вполне определенной емкости.

Все асинхронные и синхронные двигатели, предназначенные для работы от однофазных сетей переменного тока, можно разделить на двигатели с пусковыми и двигателями с постоянно включенными фазосдвигающими элементами.

В двигателях с пусковыми элементами вторая — пусковая (или вспомогательная) обмотка вместе с фазосдвигающим элементом включается лишь на время пуска. При пуске такой двигатель, по существу, является обычно несимметричным двухфазным. У него имеются две обмотки (чаще с неравными числами витков), которые создают вращающееся магнитное поле (в общем случае эллиптическое). После разгона ротора пусковая (вспомогательная) обмотка отключается от сети и двигатель работает как чисто однофазный.

Двигатели с пусковыми элементами можно разделить на двигатели с увеличенным активным сопротивлением пусковой обмотки (фазы) и двигатели с пусковым конденсатором (табл. 25.21 — 25.23). Увеличение актив-

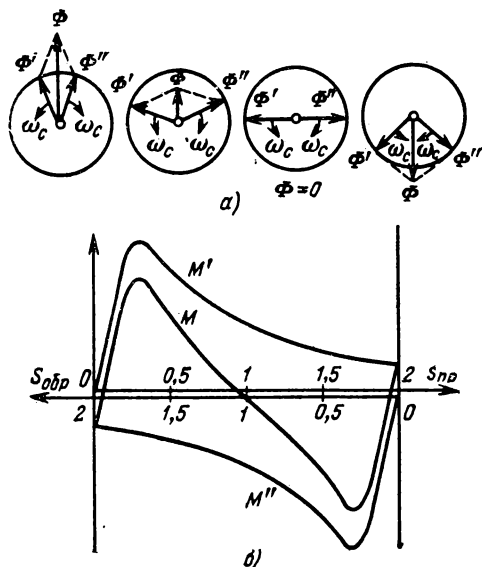


Рис. 25.6. Разложение пульсирующего магнитного поля однофазного двигателя на два вращающихся (а) и кривые вращающих моментов асинхронного двигателя (б): от прямого поля M' , обратного поля M'' , результирующего поля M

Таблица 25.21. Основные технические данные однофазных асинхронных электродвигателей с пусковым сопротивлением в закрытом исполнении серии АОЛБ

Тип двигателя	Номинальные данные					$\eta, \%$	$\cos \varphi$	$\frac{I_{\Pi}}{I_{\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$	Масса, кг, в форме исполнения		Маховой момент ротора, $10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	Оптовая цена, руб.
	$P_{\text{НОМ}}, \text{Вт}$	$n_{\text{НОМ}}, \text{об/мин}$	$I_{\text{НОМ}}, \text{А, при } U_{\text{НОМ}}, \text{В}$								Щ2/Ф3	Ф3		
			127	220	380									
АОЛБ011-4	18	1370	1,05	0,61	0,35	22	0,62	6,5	1,0	1,4	3,0	2,9	1,2	—
АОЛБ012-4	30	1390	1,38	0,80	0,46	28	0,62	6,5	1,0	1,4	3,5	3,4	1,4	—
АОЛБ11-4	50	1420	1,90	1,10	0,65	34	0,62	7,5	1,2	1,8	4,7	4,5	2,2	—
АОЛБ12-4	80	1420	2,50	1,45	0,85	41	0,62	7,5	1,2	1,8	5,6	5,4	2,6	—
АОЛБ21-4	120	1420	3,30	1,90	1,10	47	0,62	7,5	1,2	1,8	7,3	7,0	5,2	11,6
АОЛБ22-4	180	1420	4,30	2,50	1,45	53	0,62	7,5	1,2	1,8	8,8	8,5	6,4	13,5
АОЛБ31-4	240	1440	5,70	3,30	1,90	60	0,62	7,5	1,2	1,9	23	21	15	—
АОЛБ32-4	400	1440	7,60	4,40	2,55	67	0,62	7,5	1,2	1,9	30	27	21	—
АОЛБ011-2	30	2880	0,85	0,49	0,28	41	0,68	8,0	1,0	1,4	3,1	3,0	1,2	—
АОЛБ012-2	50	2880	0,18	0,68	0,39	48	0,70	8,0	1,0	1,4	3,5	3,4	1,4	—
АОЛБ11-2	80	2890	1,75	1,00	0,60	51	0,72	7,5	1,0	2,2	4,9	4,7	2,2	—
АОЛБ12-2	120	2890	2,40	1,40	0,80	55	0,72	7,5	1,0	2,2	5,8	5,6	2,6	—
АОЛБ21-2	180	2890	3,30	1,90	1,10	59	0,72	7,5	1,0	2,2	7,5	7,2	5,2	12,5
АОЛБ22-2	240	2890	4,70	2,70	1,50	63	0,72	7,5	1,0	2,2	9,1	8,2	6,4	13,6
АОЛБ31-2	400	2920	6,55	3,90	2,15	66	0,72	9,0	1,0	2,2	23	21	10	—
АОЛБ32-2	600	2940	9,50	5,50	3,20	69	0,72	9,0	1,0	2,2	30	27	16	—

Таблица 25.22. Основные технические данные однофазных модификаций асинхронных двигателей малой мощности единой серии 4А. Номинальное напряжение 220 В. Частота 50 Гц

Тип двигателя	$P_{\text{НОМ}}, \text{Вт}$	$I_{\text{НОМ}}, \text{А}$	$\eta, \%$	$\cos \varphi$	$n, \text{об/мин}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{ЛОМ}}}$	$\frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{НОМ}}}$	$C_{\text{раб}}, \text{мкФ}$	$C_{\text{пуск}}, \text{мкФ}$	Масса, кг
4AAE50B4	40	1,2	28	0,54	1335	1,6	4,5	1	—	—	3,1
4AAU50B4	40	1,2	28	0,54	1335	1,6	2,5	2,8	—	16	3,1
4AAT50B4	60	0,605	55	0,82	1380	1,6	2,5	0,6	9	—	3,1
4AAU50B4	60	0,605	55	0,82	1380	1,6	3,5	1,9	9	16	3,1
4AAE50A4	25	0,97	23	0,51	1370	1,6	4,5	1	—	—	3,0
4AAU50A4	25	0,97	23	0,51	1370	1,6	2,5	2,2	—	10	3,0
4AAT50A4	40	0,54	50	0,67	1395	1,6	2,5	0,4	6	—	3,0
4AAU50A4	40	0,54	50	0,67	1395	1,6	3,5	1,9	6	10	3,0
4AAE50B2	60	0,87	53	0,59	2890	1,9	6,5	1	—	—	3,3
4AAU50B2	60	0,87	53	0,59	2890	1,9	3,0	2,2	—	10	3,3
4AAT50B2	90	0,755	60	0,9	2850	2,0	3,5	0,5	14	—	3,3
4AAU50B2	90	0,755	60	0,9	2850	2,0	4,0	2,0	14	25	3,3
4AAE50A2	40	0,525	51	0,68	2820	1,9	6,5	1	—	—	3,1
4AAU50A2	40	0,525	51	0,68	2820	1,9	3,0	1,9	—	10	3,1
4AAT50A2	60	0,61	56	0,8	2880	2,0	3,5	0,4	10	—	3,1
4AAU50A2	60	0,61	56	0,8	2880	2,0	4,0	2,0	10	16	3,1
4AAE56B4	90	1,85	39	0,65	1380	1,5	7,5	1,0	—	—	4,5
4AAU56B4	90	1,85	39	0,65	1380	1,5	4,0	1,7	—	16	4,5
4AAT56B4	120	1,3	51	0,90	1370	1,6	4,0	0,4	18	—	4,5
4AAU56B4	120	1,3	51	0,90	1370	1,6	5,0	1,6	18	50	4,5
4AAE56A4	60	1,05	37	0,7	1380	1,5	7,5	1,0	—	—	4,0
4AAU56A4	60	1,05	37	0,7	1380	1,5	4,0	1,6	—	10	4,0
4AAT56A4	90	1,0	53	0,90	1390	1,6	4,0	0,4	12	—	4,0
4AAU56A4	90	1,0	53	0,90	1390	1,6	5,0	1,6	12	50	4,0
4AAE56B2	120	1,35	53	0,76	2800	1,6	8,5	0,8	—	—	4,5
4AAU56B2	120	1,35	53	0,76	2800	1,6	5,5	1,6	—	40	4,5
4AAT56B2	180	1,4	64	0,94	2740	1,7	4,0	0,4	18	—	4,5
4AAU56B2	180	1,4	64	0,94	2740	1,7	5,0	1,5	18	50	4,5
4AAE56A2	90	1,0	50	0,82	2800	1,6	8,5	0,8	—	—	4,0
4AAU56A2	90	1,0	50	0,82	2800	1,6	5,5	1,7	—	40	4,0
4AAT56A2	120	1,3	45	0,95	2780	1,7	4,0	0,4	22	—	4,0
4AAU56A2	120	1,3	45	0,95	2780	1,7	5,0	1,5	22	50	4,0
4AAE63B4	180	2,7	47	0,65	1380	1,5	7,5	1,0	—	—	6,0
4AAU63B4	180	2,7	47	0,65	1380	1,5	4,5	1,8	—	40	6,0
4AAT63B4	250	2,2	58	0,90	1370	1,6	4,0	0,4	33	—	6,0
4AAU63B4	250	2,2	58	0,90	1370	1,6	5,0	1,6	33	80	6,0
4AAE63A4	120	1,9	46	0,65	1400	1,5	7,5	1,0	—	—	5,5
4AAU63A4	120	1,9	46	0,65	1400	1,5	4,5	1,8	—	40	5,5
4AAT63A4	180	1,5	62	0,90	1390	1,6	4,0	0,4	22	—	5,5
4AAU63A4	180	1,5	62	0,90	1390	1,6	5,0	1,6	22	50	5,5
4AAE63B2	250	2,5	62	0,75	2760	1,7	8,5	0,8	—	—	6,0
4AAU63B2	250	2,5	62	0,75	2760	1,7	5,5	1,7	—	60	6,0
4AAT63B2	370	2,6	68	0,95	2740	1,7	4,0	0,4	39	—	6,0
4AAU63B2	370	2,6	68	0,95	2740	1,7	5,0	1,5	39	110	6,0
4AAE63A2	180	1,8	62	0,75	2800	1,7	8,5	0,8	—	—	5,5
4AAU63A2	180	1,8	62	0,75	2800	1,7	5,5	1,6	—	25	5,5
4AAT63A2	250	1,8	66	0,95	2780	1,7	4,0	0,4	27	—	5,5
4AAU63A2	250	1,8	66	0,95	2780	1,7	5,0	1,5	27	80	5,5

Продолжение табл. 25.22

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	$\eta, \%$	$\cos \varphi$	$n, \text{об/мин}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{ном}}}$	$C_{\text{раб}}, \text{мкФ}$	$C_{\text{пуск}}, \text{мкФ}$	Масса, кг
4АХЕ71В4	370	4,8	51	0,7	1400	1,5	7,5	1,0	—	—	14,5
4АХУ71В4	370	4,8	51	0,7	1400	1,5	4,0	1,8	—	60	14,5
4АХТ71В4	550	4,2	66	0,92	1320	1,5	4,0	0,4	56	—	14,5
4АХУТ71В4	550	4,2	66	0,92	1320	1,5	4,5	1,6	56	160	14,5
4АХЕ71А4	250	3,4	50	0,7	1420	1,5	7,5	1,0	—	—	13,5
4АХУ71А4	250	3,4	50	0,7	1420	1,5	4,0	1,8	—	40	13,5
4АХТ71А4	370	3,0	62	0,92	1410	1,6	4,0	0,4	47	—	13,5
4АХУТ71А4	370	3,0	62	0,92	1410	1,6	4,5	1,6	47	110	13,5
4АХЕ71В2	550	5,1	60	0,83	2800	1,7	8,5	0,8	—	—	14,5
4АХУ71В2	550	5,1	60	0,83	2800	1,7	5,5	1,7	—	100	14,5
4АХТ71В2	750	5,5	66	0,95	2780	1,7	5,0	0,4	82	—	14,5
4АХУТ71В2	750	5,5	66	0,95	2780	1,7	5,5	1,5	82	200	14,5
4АХЕ71А2	370	4,2	55	0,74	2840	1,7	8,5	0,8	—	—	13,5
4АХУ71А2	370	4,2	55	0,74	2840	1,7	5,5	1,6	—	100	13,5
4АХТ71А2	550	4,2	64	0,95	2820	1,7	5,0	0,4	68	—	13,5
4АХУТ71А2	550	4,2	64	0,95	2820	1,7	5,5	1,5	68	140	13,5

Примечания: 1. 4ААТ50А2: 4 — порядковый номер серии; А — асинхронный; А — материал корпуса (А — алюминиевый сплав, Х — чугун); Т — тип двигателя (Т — с рабочим конденсатором, УТ — с рабочим и пусковым конденсаторами, Е — с увеличенным активным сопротивлением пусковой фазы; У — с пусковым конденсатором); 50 — высота оси вращения, мм; А — длина сердечника (А — первая; В — вторая); 2 — число полюсов.

2. Режим работы для всех типов двигателей продолжительный.

3. Класс нагревостойкости для всех типов двигателей — В.

4. Исполнение, как и у всех двигателей серии (см. выше).

Таблица 25.23. Технико-экономические данные однофазных асинхронных микродвигателей с повышенным активным сопротивлением и с пусковой емкостью бытового назначения, $f = 50 \text{ Гц}$, $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$

Тип двигателя	Номинальные данные					$M_{\text{ном.}}$ Н·м	$\frac{M}{M_{\text{ном}}}$		Пусковые данные		Масса, кг	Размеры, мм	Оптовая це- на, руб.	Применение
	$P_{\text{ном.}}$ Вт	$I_{\text{ном.}}$ А	η , %	$\cos \varphi$	$n_{\text{ном.}}$ мин		$\frac{M}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$					
ДГ-0,07	70	0,1	60	0,54	1440	0,466	2,85	9,3	2,32	3,65	120×120×80	—	Привод ком- прессора холо- дильника и дру- гих механизмов	
ДГ-0,115	115	1,3	66	0,63	1430	0,768	2,42	9,0	2,04	5,75	144×144×90	—		
ДГ-2-0,14	140	1,4	66	0,65	2850	0,468	2,51	7,5	1,36	3,9	145×120×80	8,5		
ДГ-2-0,18	180	1,6	71	0,72	2850	0,604	2,43	7,8	1,13	4,7	145×120×98	9,0		
ДГ-2-0,2	200	1,8	71	0,71	2850	0,670	2,41	7,78	1,29	5,1	145×120×105	9,4		
ДБСМ-1 ДАО-А	180	2,6	55	0,57	1420	1,2	1,7	4,45	0,97	5,7	147×147×126	—	Привод активатора стиральной машины	
	180	2,1	60	0,67	1420	1,21	1,7	5,5	1,25	7,8	168×168×136,5	8,5		
ДХМ-2/60	60	0,77	60	0,59	2870	0,193	2,64	6,76	2,13	2,22	120×101×75	—	Привод хладо- компрессора до- машнего холо- дильника	
ДХМ-2/75	75	0,98	61	0,575	2880	0,242	2,91	6,72	1,82	2,54	120×101×80	5,8		
ДХМ-2/90	90	0,97	66	0,642	2900	0,288	3,1	8,66	1,75	2,97	120×101×86	6,0		
ДХМ-2/120	120	1,37	68	0,58	2910	0,373	3,13	8,32	2,22	3,41	120×101×93	6,5		
ДХМ-2/150	150	1,57	70	0,62	2910	0,478	3,1	8,53	2,05	4,1	120×101×103	7,70		
ДХМ-5	93	1,26	60	0,56	1440	0,616	2,22	5,7	1,82	5,3	160×86,6	5,7		

Примечания: 1. Режим работы: для двигателей ДБСМ-1, ДАО-А — повторно-кратковременный S3 (ПВ=60%), для остальных типов двигателей — продолжительный S1.

2. Исполнение по способу защиты: для двигателей ДБСМ-1 и ДАО-А — открытое, для остальных типов двигателей — встроенное (в виде отдельных сборок).

3. Класс нагревостойкости: для двигателей ДХМ-2/60, ДХМ-2/75, ДХМ-2/90, ДХМ-2/120, ДХМ-2/150-Е; для остальных типов двигателей — А.

ного сопротивления пусковой обмотки — фазы у первых из них достигается либо за счет ее выполнения из провода с меньшим, чем у рабочей фазы, сечением, либо за счет включения последовательно с пусковой обмоткой резистора. В некоторых двигателях с целью увеличения активного и одновременного уменьшения индуктивного сопротивления пусковой обмотки часть ее витков наматывается в различных направлениях.

На рис. 25.7 представлены схемы включения и механические характеристики однофазных асинхронных микродвигателей различных типов.

В двигателях с постоянно включенными фазосдвигающими элементами (рис. 27.7, в—д) как при пуске, так и при работе остаются включенными под напряжение обе обмотки (фазы). Такие двигатели в обоих режимах (и при пуске, и при работе) являются двух-

Таблица 25.24. Основные технические данные однофазных асинхронных электродвигателей серии АВЕ

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, Вт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$I_{\text{ном}}$, А, при $U_{\text{ном}}$, В		η , %	$\cos \varphi$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	Масса, кг, при исполнении		Момент инерции ротора, 10^{-3} кг·м ²	Емкость рабочего конденсатора, мкФ, при $U_{\text{ном}}$, В		Оптовая цена, руб.
			C_p	C_p				Ш2Р	Ф3	127	220				
													при рабочем конденсаторе	при рабочем конденсаторе	
АВЕ041-2	18	2700	0,40	0,23	40	0,90	1,5	0,5	2,5	1,5	1,4	1,25	2,25	0,75	12,5
АВЕ042-2	30	2700	0,49	0,28	50	0,90	1,5	0,5	3,0	1,90	1,75	1,6	4,0	1,25	—
АВЕ051-2	50	2700	0,74	0,43	55	0,90	1,7	0,45	3,0	2,6	2,3	3,6	9,0	3,0	—
АВЕ052-2	80	2700	1,11	0,66	58	0,95	1,7	0,45	3,5	2,9	2,7	4,7	12	4,0	—
АВЕ061-2	120	2700	1,40	0,845	66	0,95	1,8	0,45	3,5	4,4	4,1	8,2	18	6,0	—
АВЕ062-2	180	2700	2,20	1,27	68	0,96	1,8	0,45	3,5	5,3	4,9	11,0	18	6,0	—
АВЕ071-2	270	2800	3,20	1,85	70	0,95	1,8	0,45	4,5	6,9	6,4	31,0	18	6,0	—
АВЕ072-2	400	2800	4,60	2,66	72	0,95	1,8	0,45	4,5	8,4	7,9	38,0	24	8,0	—
АВЕ041-4	10	1300	0,274	0,158	30	0,90	1,5	0,5	2,5	1,5	1,4	1,25	3,0	1,0	—
АВЕ042-4	18	1300	0,386	0,223	40	0,90	1,5	0,5	2,5	1,90	1,75	1,6	3,0	1,0	—
АВЕ051-4	30	1350	0,64	0,37	41	0,86	1,5	0,5	2,5	2,6	2,3	3,6	4,5	1,5	—
АВЕ052-4	50	1350	0,83	0,51	50	0,90	1,5	0,5	2,5	2,90	2,7	4,7	7,5	2,5	—
АВЕ061-4	80	1350	1,10	0,63	56	0,95	1,7	0,5	3,0	4,4	4,10	13,5	8,0	3,0	—
АВЕ062-4	120	1350	1,66	0,93	60	0,95	1,7	0,5	3,0	5,3	4,90	18,5	12,0	4,0	—
АВЕ071-4	180	1350	2,33	1,35	63	0,95	1,8	0,5	3,5	6,9	6,4	57,0	15,0	5,0	—
АВЕ072-4	270	1350	3,46	2,0	63	0,95	1,8	0,5	3,5	8,4	7,9	72	18,0	6,0	13,6

фазными, хотя они и питаются от однофазной сети.

В табл. 25.24, 25.25 приведены основные технические данные серий асинхронных конденсаторных двигателей, получивших в настоящее время достаточно широкое распространение.

Универсальные двигатели переменного тока

Универсальными называются такие двигатели, которые могут работать как от трехфазных, так и от однофазных сетей переменного тока. Эти двигатели обычно выполняются как трехфазные, но рассчитываются так, чтобы при определенной схеме включения обмоток с использованием одного или нескольких конденсаторов обеспечивать вполне приемлимые характеристики и при работе от однофазной сети. Обычно при однофазном питании универсальные двигатели имеют несколько пониженные рабочие и пусковые свойства.

На рис. 25.8 представлены схемы включения асинхронных универсальных микродвигателей серии УАД, а в табл. 25.26, 25.27 — их основные технические данные.

Однофазные асинхронные двигатели с экранированными полюсами (см. рис. 25.7, г). Это наиболее простые, дешевые и надежные однофазные микродвигатели. Они обычно рассчитываются на небольшие мощности — от долей ватта до нескольких десятков ватт. Вращающееся магнитное поле (не круговое, а эллиптическое) получается в двигателе за счет наличия в нем двух магнитных потоков, сдвинутых во времени (на угол β) и в пространстве (на угол θ): потока Φ' , проходящего по основным частям полюсов, и потока Φ'' , проходящего по частям полюсов, охваченных короткозамкнутыми витками — экранами (рис. 25.9). Магнитное поле двигателя далеко от кругового, поэтому пусковые и рабочие свойства двигателя невысоки. Это несколько ограничивает области его применения. Обычно $\eta = 0,1 \div 0,4$; $\cos \varphi = 0,5 \div 0,6$; $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 0,1 \div 1$.

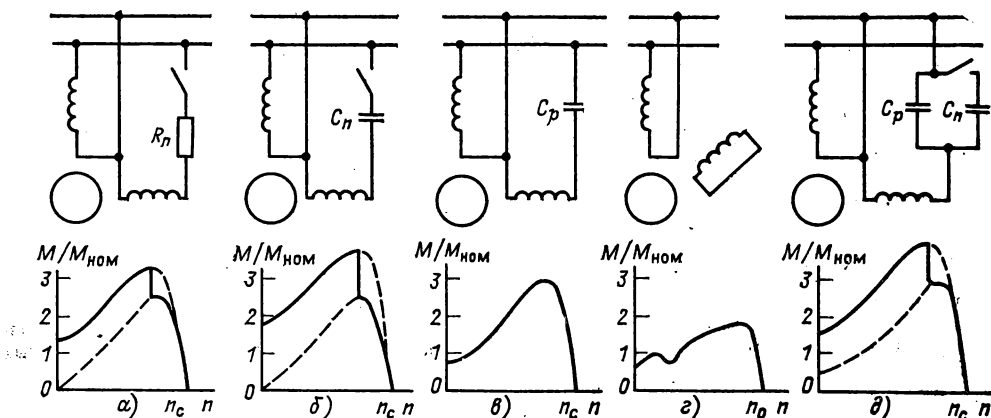


Рис. 25.7. Схемы включения и механические характеристики однофазных асинхронных микродвигателей:

а — с пусковым резистором; б — с пусковым конденсатором; в — с рабочим конденсатором; г — с экранированными полюсами; д — с рабочим и пусковым конденсаторами

Таблица 25.25. Техно-экономические данные асинхронных конденсаторных микродвигателей бытового назначения, $f=50$ Гц

Тип двигателя	Номинальные данные						Пусковые данные			$\frac{P_{\text{д}}}{C_p}$, $\frac{\text{Ом}}{\text{мкФ}}$	Превыше- ние темпе- ратуры (класс на- гревостой- кости изо- ляции), °С	Масса, кг	Габаритные размеры, мм	Оптималь- ная, р/с	Применение
	$P_{\text{ном.}}$ Вт	$U_{\text{ном.}}$ В	$I_{\text{ном}}$ А	η , %	$\cos \phi$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$		$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$						
							$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$							
КД-2.5-4	2,5	127	0,14	15	0,95	1400	—	—	1,26	1,0	510/—	0,75	Ø89×45	5,1	Звукозаписывающая аппаратура
КД-3.5	6	127	0,21	24	0,92	1400	1,3	—	0,7	2,0	—	1,0	65×72×76	5,6	
КД-6-4**	6	220	0,11	29	0,87	1400	—	—	0,9	4,0	130/—	1,2	Ø89×53,5	7,0	
КД-7М	10	127	0,36	24	0,9	1420	2,2	—	0,99	4,0	270/—	1,6	84×91×80	7,0	
КДП-6-4*	16/46*	70/127	0,2/ 0,4	—	—	—/1350	—	—	300/ 1200**	4,0	—	2,3	Ø89×53,5	7,3	Перемотка ленты в аппаратуре звукозаписи
КД-25	25	220	0,27	47	0,90	1350	1,9	—	0,66	1,5	—	2,4	90×92×102	4,9	Ленточный перфоратор, пишущая машинка
КДР**	25	220	0,29	40	0,96	2750	2,24	—	0,79	2,0	—	1,1	65×65×83	5,1	Электропелотенне
КД-30**	50	127/ 220	0,7/ 0,4	55	0,93	2800	3,3	—	0,63	2,0	—	2,4	86×90×105	4,4	Контрольно-кассовые аппараты
КД-50**	50	220	0,37	60	0,95	2750	2,4	—	0,45	3,5	—	2,4	92×92×102	4,5	Привод осциллографа, кухонный вентилятор
КД-50С	50	220	0,75	46	0,79	2750	1,4	—	1,0	8,0	—	2,2	90×92×102	5,2	Вычислительная аппаратура

ДЦСМ-3	120	220	1.2	48	0,91	2600	2,67	2,6	1,55	10,0	—	Е	5,0	Ø120×126	8,8	Привод центрифуги бытовой стиральной машины
ДГ-02	200	220	1,6	70	0,81	1440	2,58	4,37	2,2	10,0	—/30	50	6,5	Ø161,5×100	9,0	Привод холодильного компрессора торгового холодильника
ДГ-0,25	250	220	1,74	77	0,85	1440	2,48	7,5	2,48	10,0	—/60	А	7,8	Ø161,5×114	13,7	
ДГ-0,35	350	220	2,57	73	0,85	1440	2,62	7,0	2,96	16,0	—/90	А	9,6	Ø161,5×129	16,3	
ДГ-0,55	550	220	3,8	79	0,83	1440	2,54	7,4	2,68	20,0	—/150	А	11,0	Ø161,5×140	18,4	
КД-16-2/40Р	16	220	0,26	34	0,80	2800	1,7	3	0,6	12/1 ^{а3}	—	75	1,3	74×74×83	6,2	Для бытовых приборов
КД-25-2/40Р	25	220	0,35	37	0,80	2800	1,7	3	0,64	10/2,2	—	75	1,4	74×74×88	6,3	
КД-6-4/40Р	6	220	0,2	16	0,90	1350	1,7	2	1,0	3,3/1	—	75	1,0	74×74×78	7,1	
КД-10-4/40Р	10	220	0,27	18	0,90	1350	1,7	2	0,8	10/1,5	—	75	1,3	74×74×83	7,3	
КД-16-4/40Р	16	220	0,32	24	0,82	1350	1,7	2	0,8	12/2,2	—	75	1,8	74×74×98	8,5	
КД-40-2/45Р	40	220	0,41	49	0,89	2770	1,75	3,5	0,65	12/2	—	75	1,95	86×86×94	6,3	
КД-50-2/45Р	60	220	0,57	52	0,90	2770	1,75	3,5	0,65	18/4	—	75	2,25	86×86×99	7,8	
КД-25-4/45Р	25	220	0,38	35	0,80	1390	1,75	3	0,65	18/2	—	75	1,95	86×86×94	6,4	
КД-40-4/45Р	40	220	0,52	40	0,80	1390	1,75	3	0,6	27/4	—	75	2,65	86×86×109	7,3	

* Мощность потребления: при $U=70$ В к. з. (60 мин) — режим подпитки, при $U=127$ В, х. х. (5 мин) — режим перемотки.

^{а2} Предусмотрено тропическое исполнение (КД-30Т, КД-50Т, КДРГТ).

^{а3} Пусковой момент $M_{\text{п}}$ (Г·см).

^{а4} Обмотки статора включены последовательно.

^{а5} Предусмотрено последовательное и параллельное включения обмотки статора.

Примечания: 1. Режимы работы для двигателей КД-30, КД-50, КД-50С — повторно-кратковременный S3 (ПВ=25 %), для двигателя КДП-6-4 — перемежающийся S6, для остальных типов двигателей — продолжительный S1.

2. Исполнение по способу защиты для двигателей ДГ-0,2, ДГ-0,25, ДГ-0,35, ДГ-55 — встроенное в виде отдельных сборок (статор, ротор), для двигателей ДЦСМ-3 — защищенное, для остальных типов двигателей — открытое IP00.

Таблица 25.26. Основные технические данные двигателей серии УАД в трехфазном режиме при $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$

Тип двигателя	Мощность на валу $P_{\text{ном}}$, Вт	Частота вращения $n_{\text{ном}}$, об/мин	Ток $I_{\text{ном}}$, А	η , %	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$
УАД-12	1,5	2700	0,055	14	2,5	2,5	2
УАД-22	4	2700	0,08	28	2	1,5	2
УАД-32	7	2700	0,11	30	2	2	2,5
УАД-42	13	2700	0,13	45	2	2	3,2
УАД-52	20	2700	0,17	55	2	2	4,5
УАД-62	40	2700	0,25	60	1,5	1,5	6
УАД-72	70	2700	0,4	65	1,5	1,5	6
УАД-24	1,2	1280	0,05	9	2	1,5	1,5
УАД-34	2,5	1250	0,09	11	1,5	1,5	1,5
УАД-44	6	1280	0,13	20	1,5	1,5	2
УАД-54	9	1280	0,17	25	1,5	1,5	2,5
УАД-64	20	1280	0,23	40	1,5	1,5	3
УАД-74	30	1280	0,3	50	1,5	1,5	3,5

Таблица 25.27. Основные технические данные двигателей серии УАД в однофазном режиме при $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, Вт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$I_{\text{ном}}$, А	η , %	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	С, мкФ	Размеры корпуса, мм		Масса, кг
									L	D	
УАД-12	1	2750	0,055	10	2	0,5	2	0,5	58	40	0,25
УАД-22	3	2750	0,08	20	2	0,5	2	1	60	50	0,44
УАД-32	5	2750	0,11	25	1,5	0,3	2,5	1,5	70	50	0,53
УАД-42	10	2750	0,13	44	1,5	0,3	3	1,5	75	62	0,80
УАД-52	18	2750	0,19	50	1,5	0,3	3,5	2	88	62	1,01
УАД-62	30	2750	0,3	54	1,5	0,2	4	4	95	75	1,48
УАД-72	50	2750	0,42	60	1,5	0,1	5	5	115	75	1,93
УАД-24	1	1280	0,055	9	1,5	0,5	1,5	0,5	60	50	0,38
УАД-34	2	1280	0,09	11	1,5	0,5	1,5	1	70	50	0,5
УАД-44	4	1300	0,14	14	1,5	0,5	1,5	2	75	62	0,75
УАД-54	8	1300	0,16	25	1,5	0,5	2	2	88	62	0,98
УАД-64	15	1300	0,23	35	1,5	0,3	2,5	3	95	75	1,42
УАД-74	25	1300	0,3	45	1,5	0,2	3	4	115	75	1,87

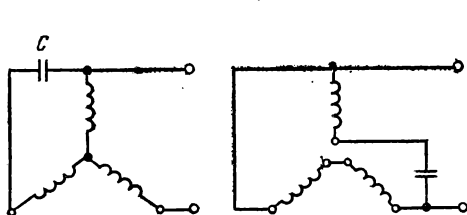


Рис. 25.8. Схемы включения в однофазную сеть универсального асинхронного микродвигателя серии УАД

С целью улучшения пусковых и рабочих свойств иногда воздушный зазор под частью неэкранированной части полюса делается в 2—3 раза большим, чем под остальной частью полюса. С этой же целью применяются ферромагнитные шунты между полюсами, а иногда на полюсах располагается по несколько короткозамкнутых витков с различными охватами полюсов.

Одной из особенностей асинхронных двигателей переменного тока с явно выраженными полюсами, в том числе и двигателей с экранированными полюсами, является малая кратность их пускового тока [$I_{\text{п}} = (1,2 \div 1,5)I_{\text{ном}}$]. Последнее объясняется тем, что значительная часть магнитного потока, создаваемого током обмотки ротора, проходит по

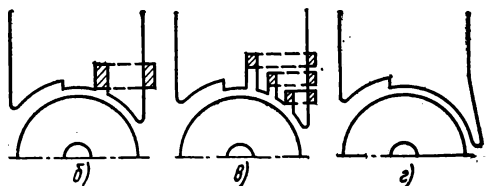
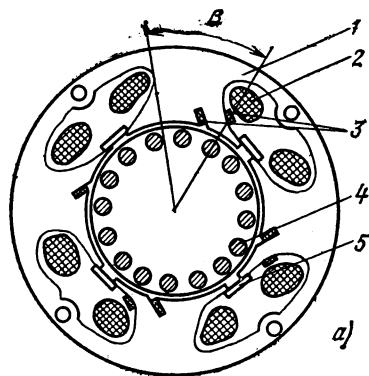


Рис. 25.9. Асинхронные микродвигатели с экранированными полюсами:

а — поперечный разрез двигателя с шунтами (1 — статор, 2 — обмотка возбуждения; 3 — короткозамкнутый виток; 4 — обмотка ротора; 5 — шунт); б — двигатели различных конструктивных исполнений

явно выраженным полюсам статора (в их перпендикулярном направлении), не сцепляясь с первичной обмоткой — сосредоточенной обмоткой статора и не вызывая вследствие этого увеличения первичного тока, как это имеет место в машинах с неявно выраженными полюсами и в трансформаторах, где $I_1 = I_0 - I_2'$.

Вследствие этого, а также вследствие весьма значительных электрических потерь в короткозамкнутых витках-экранах суммарные потери в двигателе при изменении его нагрузки от холостого хода до короткого замыкания (пуска) изменяются сравнительно мало. Именно поэтому двигатели с экранированными полюсами довольно длительное время могут находиться под напряжением при неподвижном роторе.

Двигатели с экранированными полюсами имеют сравнительно невысокие пусковые ($M_n/M_{ном} = 0,1 \div 1$) и энергетические ($\eta = 0,1 \div 0,4$; $\cos \varphi = 0,5 \div 0,6$) показатели, сравнительно большие габариты и массу, что ограничивает области их применения. Они применяются чаще всего для приводов с вентиляторной механической характеристикой.

Широкое применение они находят для приводов бытовых настольных вентиляторов. Небольшая кратность их пускового тока обеспечивает высокую надежность вентиляторов, которые не выходят из строя даже в тех случаях, когда лопасти за что-то цепляются и двигатель длительное время находится в режиме короткого замыкания.

Б. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

25.9. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИНХРОННЫХ МАШИНАХ БОЛЬШОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ, ВЫПУСКАЕМЫХ В СССР

В сводных табл. 25.28—25.32 приводятся обобщенные данные основных типов турбогенераторов, гидрогенераторов, синхронных

компенсаторов, а также синхронных генераторов и двигателей общего и специального назначения, изготавливаемых в СССР серийно.

В последующих параграфах сообщаются более подробные сведения о некоторых типах синхронных машин. Приводимые ниже технические данные машин составлены на основании каталожно-справочных материалов [25.16], оптовые цены даны в соответствии с [25.17, 25.18].

Т а б л и ц а 25.28. Турбогенераторы

Тип	$P_{ном}$, МВт	$n_{ном}$, об/мин	$U_{ном}$, кВ	Краткая характеристика
Т	2,5; 4; 6; 12; 20	3000	3,15; 6,3; 10,5	Исполнение закрытое. Охлаждение воздушное по замкнутому циклу
ТВС	32	3000	6,3; 10,5	Исполнение закрытое. Косвенное водородное охлаждение
ТВФ	55; 63; 100; 110	3000	6,3; 10,5	Косвенное охлаждение обмотки и сердечника статора водородом, непосредственное охлаждение обмотки ротора водородом
ТВВ	160; 200; 300; 500; 800; 1200	3000	15,75—24	Непосредственное охлаждение обмотки статора водой, непосредственное охлаждение обмотки ротора водородом при избыточном давлении, заполнение корпуса статора водородом
ТВВ	1000	1500	24	Непосредственное охлаждение обмоток статора и ротора водородом
ТГВ	200; 300	3000	15,75; 20	Непосредственное охлаждение обмотки статора водой, непосредственное охлаждение обмотки ротора и активной стали водородом
ТГВ200М	200	3000	15,75	Непосредственное охлаждение обмоток статора и ротора водородом
ТГВ	500	1500, 3000	20	Непосредственное охлаждение обмотки статора водой, непосредственное охлаждение обмотки ротора и активной стали водородом
ТЗВ	800	3000	24	Непосредственное охлаждение обмоток статора и ротора водой и сердечников статора и ротора водородом
ТВМ	300; 500	3000	20; 36,75	Полное водяное охлаждение Непосредственное охлаждение обмотки и сердечника статора изоляционным маслом, непосредственное охлаждение ротора водой

Т а б л и ц а 25.29. Гидрогенераторы

Тип	$S_{ном}$, МВ·А	$n_{ном}$, об/мин	$U_{ном}$, кВ	Краткая характеристика
СГГ	0,63—3,125	600; 750	6,3	Горизонтальные для высоконапорных гидроэлектростанций; защищенные с вентиляцией по разомкнутому циклу; прямая электромашина система возбуждения
СГК	5,67—23,3	78,9—150	1,45—4,0	Горизонтальные капсульные, с косвенным воздушным охлаждением
СГКВ	20; 28; 45,9	93,8; 6,2; 75	3,15; 4,16; 6,3	Горизонтальные капсульные, с непосредственным охлаждением обмоток статора и ротора водой

Продолжение табл. 25.29

Тип	$S_{\text{ном}}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	Краткая характеристика
СВ	28,75—306	57,7—428,6	10,5; 15,75	Вертикальные, индивидуального исполнения, с косвенным воздушным охлаждением
СВО	45,6; 209; 236	150; 166,7	10; 15; 15,75	Вертикальные обратимые двигатель-генераторы (для ГАЭС) с воздушным охлаждением
СВФ	590; 711	93,8; 142,8	15,75	Вертикальные, с непосредственным охлаждением обмотки статора водой и форсированным охлаждением обмотки ротора воздухом
ВГС	3,0—282	50—600	6,3—15,75	Вертикальные индивидуального исполнения, с косвенным воздушным охлаждением
ВГСФ	294	200	15,75	Вертикальные, с непосредственным охлаждением обмотки статора воздухом и форсированным охлаждением обмотки ротора воздухом
ВГСВФ	353	200	15,75	Вертикальные, с непосредственным охлаждением обмотки статора водой и форсированным охлаждением обмотки ротора воздухом

Т а б л и ц а 25.30. Синхронные компенсаторы

Тип	$S_{\text{ном}}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	Краткая характеристика
КС	16	6,3; 10,5	1000	Закрытые, с косвенным воздушным охлаждением по замкнутому циклу
КСВ	50; 100; 160	11; 15,75	750	Косвенное охлаждение обмотки статора и форсированное охлаждение обмотки ротора водородом при избыточном давлении 0,1—0,2 МПа
КСВБ, КСВБО	50; 100; 160	11; 15,75	750	То же, что КСВ, только с бесщеточной системой возбуждения; КСВБО — с реверсивным возбуждением

Т а б л и ц а 25.31. Синхронные генераторы

Тип	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	Краткая характеристика
ЕСС	5—50	1500	230; 400	Защищенные, возбуждение через полупроводниковые выпрямители. Общего назначения
ЕСС5	8—75	1000; 1500	230; 400	Горизонтальные защищенные, с аксиальной вытяжной вентиляцией. Общего назначения
СГ2	125—315	500; 600; 1000	400	Защищенные, с радиальной самовентиляцией. Возбуждение от тиристорного преобразователя, питающегося от дополнительной обмотки
СГД (10-й габарит)	75—200	750; 1000; 1500	230; 400	Горизонтальные, защищенные, с аксиальной вытяжной вентиляцией. Возбуждение прямое с использованием клиноремной передачи. Предназначаются для сопряжения с дизелем
СГД2	400—800	375	400; 6300	Горизонтальные, с приводом от дизелей, с самовентиляцией, со статической системой возбуждения
СГДС	1000—1250	750	10500; 6300	Закрытые, с принудительной вентиляцией по замкнутому циклу; электромашина система возбуждения
ОС	5—125	1500	230; 400	Для общепромышленного применения
ГМС	200—500	500	230; 400	Горизонтальные, брызгозащищенные, с самовентиляцией. Для работы в комплекте с дизелем на морских судах (500 Гц)
ГИМ-1	0,8; 1	3000	220	Трехфазные синхронные генераторы индукторного типа разноименно-полюсного исполнения. Генераторы ГИС-2 горизонтальные закрытые. Генераторы ГИМ-1 — вертикальные, в обдуваемом исполнении, в комплекте с двигателем образуют одномашинный агрегат. Предназначаются для питания высокочастотных двигателей (300, 400, 600, 800, 1200, 1600, 2400 Гц)
ГИС-2	2; 3	3000	80	Горизонтальные защищенные, с постоянными магнитами, 400 Гц, для питания цепей регулирования турбогенераторов
ГСПМ	37,5	3000	230; 400	Горизонтальные, закрытые, 400 Гц
ГПЧ	12; 75	1500	230	Горизонтальные, закрытые, 400 Гц

Т а б л и ц а 25.32. Сихронные двигатели

Тип	$P_{\text{ном}}$, МВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$U_{\text{ном}}$, кВ	Краткая характеристика
СД2	0,132—1,0	500; 600; 750; 1000; 1500	0,38; 6	Горизонтальные, защищенные, с самовентиляцией; тиристорное возбуждение с питанием от дополнительной обмотки; общего назначения
СДН2, СДН32	0,315—4,0	300; 375; 500; 600; 750; 1000	6	Горизонтальные, на стояковых подшипниках, открытые (СДН2) и закрытые (СДН32), с тиристорной системой возбуждения; общего назначения
СДЗ	0,16—1,0	500; 600; 750; 1000; 1500	0,38; 6	Горизонтальные, закрытые, с принудительной вентиляцией, с прямой электромашиной системой возбуждения; общего назначения
БСДК, БСДКП	0,2	500	0,38	Открытые, с самовентиляцией (БСДК) и взрывозащищенные с принудительной вентиляцией (БСДКП); бесщеточная система возбуждения; для привода компрессоров
ВДС, ВДС2	4,0—12,5	187,5; 214; 250; 300; 333; 375	6; 10	Вертикальные, подвесные, с водяными воздухоохладителями; вентильное или электромашиное возбуждение; для привода вертикальных гидравлических насосов
ВСДН (СДВ)	0,63—3,2	375; 500; 600; 750	6	Подвесные, защищенные, с самовентиляцией по разомкнутому циклу; статическая вентильная система возбуждения; для привода вертикальных гидравлических насосов
ДСЗ (21-го габарита)	12,5—22	375	6; 10	Закрытые, с самовентиляцией по замкнутому циклу; вентильная система возбуждения; для привода агрегатов прокатного стана
СДК2	0,315—0,68	375; 500; 600	3; 6	Защищенные; возбуждение от тиристорных возбудителей; для привода поршневых компрессоров
СДКП2	0,315—5,0	300; 375; 500; 600	3; 6; 10	Взрывозащищенные, продуваемые; то же, что СДК2
СДМЗ	0,63—3,2	100; 150	6	Закрытые, с принудительной вентиляцией по замкнутому циклу; тиристорная система возбуждения; для привода мельниц
СДСЗ, МС213, МС325, СДСП	0,63—19,5 3,2—10,9 0,88—2,0	300; 375 500; 750 250; 300; 375	6; 10; 10,5	Горизонтальные, на стояковых подшипниках, закрытые с принудительной вентиляцией; для комплекции прокатного оборудования
СДЭ-2	0,5—2,5	1000		Взрывозащищенные; для привода поршневых компрессоров
СТД	0,63—12,5	3000	6; 10	Защищенные, с самовентиляцией; тиристорное возбуждение; для привода экскаваторных агрегатов
СТДП	1,25—12,5	3000	6; 10	Закрытые, для работы в невзрывоопасной среде; бесщеточная система возбуждения; для привода быстроходных механизмов
СДЗ-2	0,25—1,0	600; 750; 1000; 1500	6	Взрывозащищенные, продуваемые; то же, что СТД
				Закрытые, с самовентиляцией; тиристорная система возбуждения; для привода дисковых мельниц

25.10. ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ

В СССР турбогенераторы выпускаются в виде нескольких серий, в пределах каждой из которых использованы единые конструктивные решения. Обозначение типа турбогенераторов расшифровывается следующим образом: буквенная часть указывает на принадлежность к серии (принятую систему охлаждения) (см. табл. 25.28); следующее за ней число означает мощность в мегаваттах (кроме генераторов ТВФ-120 и ТВВ-320, мощность которых равна 100 и 300 МВт); следующая цифра означает число полюсов; последние буква и цифра

указывают на исполнение машины по климатическим условиям работы (далее приводятся данные генераторов, имеющих исполнение по климатическим условиям УЗ). На мощность до 20 МВт производятся турбогенераторы серии Т с косвенным воздушным охлаждением по замкнутому циклу самовентиляции. Генераторы имеют исполнение по степени защиты IP43. Возбуждение осуществляется от бесщеточных возбудительных устройств серии БВУГ или электромашиных возбудителей серии ВТ. Генератор Т-20-2 возбуждается от электропреобразовательного агрегата АП-30.

Т а б л и ц а 25.33. Технические данные турбогенераторов серии Т ($\cos \varphi=0,8$; $f=50$ Гц)

Тип	$P_{\text{ном}}$, МВт	$U_{\text{ном}}$, кВ	η , %	Возбуждение		Масса, т, не более	Оптовая цена, тыс. руб.
				U_f , В	I_f , А		
Т-2,5-2	2,5	3,15; 6,3	97	83	243	12,5	22,4
Т-4-2	4	3,15; 6,3	97,3	113	274	15	28,1
Т-6-2	6	6,3 10,5	97,6	140	248	20	38,1 38,7
Т-12-2	12	6,3 10,5	97,6	234	247	27	60,1 61,6
Т-20-2	20	10,5	97,6	192	548	60	130

Примечание. Масса и цена генераторов указаны без учета системы возбуждения.

Таблица 25.34а. Основные технические данные турбогенераторов серий ТВС, ТВФ, ТВВ, ТГВ, ТВМ

Тип	$P_{\text{ном}}$, МВт	$U_{\text{ном}}$, кВ	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	η , %	Избыточное давление во- дорода, МПа	Индуктивные сопротив- ления, %					Постоянные времени, с				r_f , Ом (15 °C)	Токи воз- буждения, А	
						x_d''	x_d'	x_d	x_s	x_0	T_d''	T_d'	T_f	T_a		I_{fx}	$I_{f\text{ном}}$
ТВС-32-2	32	6,3 10,5	0,8	98,3	0,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	490
ТВФ-63-2	63	6,3 10,5	0,8	98,4	0,2	20,3	30,2	191	24,8	10,2	—	—	6,2	—	0,103	538	1465
ТВФ-120-2	100	10,5	0,8	98,4	0,2	15,3	26,8	218	18,6	8,8	—	—	8,9	—	0,103	462	1325
ТВФ-110-2	110	10,5	0,8	98,4	0,25	19,2	27,8	191	23,4	9,7	0,12	0,9	6,5	0,4	0,12	634	1715
						18,9	27,1	204	23,0	10,6	0,03	0,89	6,7	0,41	0,126	620	1740
ТВВ-160-2	160	18	0,85	98,5	0,3	22,1	32,9	230	26,9	11,5	0,1	0,84	5,9	0,3	0,116	755	2300
ТВВ-200-2	200	15,75	0,85	98,6	0,3	18,0	27,2	211	22	10	0,1	0,9	7,0	0,3	0,088	920	2540
ТВВ-220-2	220	15,75	0,85	98,6	0,3	20	30	232	24	11	0,1	0,9	7,0	0,3	0,088	920	2740
ТВВ-320-2	300	20	0,85	98,7	0,4	17,3	25,8	167	21,1	8,8	0,1	0,9	5,9	0,4	0,115	1200	2900
ТВВ-500-2	500	20	0,85	98,7	0,45	24,2	35,5	256	29,5	14,1	0,16	1,28	9,2	0,34	0,1	1075	3530
ТВВ-800-2	800	24	0,9	98,75	0,5	21,9	30,7	233	26,7	11,7	0,15	1,23	9,3	0,33	0,12	1287	3790
ТВВ-1200-2	1200	24	0,9	98,8	0,5	24,8	35,8	242	30,2	15,2	0,18	1,42	8,5	0,38	0,051	2460	7530
ТВВ-1000-4	1000	24	0,9	98,7	0,5	32,4	45,8	241	39,5	14,9	0,22	1,7	9,1	0,34	0,05	2250	7020
ТГВ-200	200	15,75	0,85	98,6	0,3	19	29,5	184	23,2	8,4	0,14	1,1	6,9	0,55	0,174	720	1880
ТГВ-200М	200	15,75	0,85	98,6	0,3	21,3	32	190	26	9,14	0,14	1,09	6,5	0,32	0,174	710	1880
ТГВ-300	300	20	0,85	98,7	0,3	19,5	30	219	23,8	9,63	0,12	0,96	7,0	0,54	0,103	1060	3050
ТГВ-500	500	20	0,83	98,84	0,3	24,3	37,3	241	29,6	14,6	0,12	0,98	6,3	0,47	0,068	1605	5120
ТГВ-500-4	500	20	0,85	98,82	0,3	26,8	39,8	216	32,7	13	0,16	1,27	6,9	0,37	0,084	1500	4380
ТВМ-300	300	20	0,85	98,8	—	20,4	35,2	211	—	—	—	—	6,9	—	—	—	4420
ТВМ-500	500	36,75	0,85	98,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 25.34б. Габаритные размеры и другие данные турбогенераторов серий ТВС, ТВФ, ТВВ, ТГВ и ТВМ

Тип турбогенератора	Тип возбудителя	Размеры, м (см. рис. 24.28, 24.29)					Масса, т			J , т·м ²	Критическая частота вращения, об/мин	Цена с возбудителем, тыс. руб.
		L	B	C_1	C	h	рого-ра	стато-ра	общая			
ТВС-32-2	ВТС-170С-3000	8,88	1,76	—	—	0,75	—	—	78,4	—	—	205
ТВФ-63-2	ВТ-450-3000	10,3	1,96	2,7	1,65	0,92	25,4	89,4	140	2,4	—	278
ТВФ-120-2	ВТД-490-3000	11,38	1,98	3,08	1,8	0,92	30,8	113,5	177	3,25	—	371
ТВФ-110-2	ВТД-490-3000	11,15	1,88	3,0	1,7	0,92	28,9	94,7	145	—	—	—
ТВВ-160-2	ВТ-2350-2	12,65	1,88	3,03	1,7	0,92	30,8	115	167	4,45	1440/4300	541
ТВВ-200-2	ВТ-4000-2	13,88	1,98	3,55	1,8	0,92	41,8	170	269	5,28	1350/3400	627
ТВВ-220-2	ВТ-4000-2	13,88	1,98	3,55	1,8	0,92	41,8	170	269	5,28	1350/3400	637
ТВВ-320-2	ВТ-4000-2	15,92	2,35	4,52	2,15	0,92	55,1	202	376	7,44	900/2600	829
ТВВ-500-2	ВТ-5000-2	17,18	2,68	4,8	2,07	0,92	65	225	420	10,0	820/2330	1438
ТВВ-800-2	ВТ-6000-2	19,3	2,78	5,35	2,0	0,92	84	322	589	16,0	680/1680	2695
ТВВ-1200-2	БВД-4000-3000	25,16	3,2	6,02	2,0	0,92	104	410	717	—	—	—
ТВВ-1000-4	БВД-4600-1500	21,82	3,05	5,63	2,1	1,35	156	333	746	—	—	5316
ТГВ-200	Тиристорная система самовозбуждения	11,68	2,36	4,86	1,90	0,92	48,1	201	291	—	—	—
ТГВ-200М		11,68	2,35	4,86	1,90	0,92	48,1	170	254	—	—	588
ТГВ-300	СТВ-12БУЗ	12,03	2,4	5,30	2,0	0,92	55,8	254	362	8,5	1280/3700	820
ТГВ-500	Тиристорная система независимого возбуждения	12,65	2,5	4,61	1,55	0,98	62	219	361	8,2	1230/4200	1369
ТГВ-500-4	БТВ-500-4	14,13	2,81	4,50	1,65	1,35	154	240	500	—	—	—
ТВМ-300	ТВМ-1400-1000	19,77	2,02	4,45	1,58	0,92	54	224	393	6,4	936/2560	—
ТВМ-500	—	18,11	—	—	—	0,92	63,5	244	340	—	—	1622

Примечание. Общая масса генераторов указана с учетом массы возбудителей; в стоимость генераторов входит стоимость возбудителей (кроме генераторов серий ТГВ и ТВМ) и аппаратуры водородного, водяного и масляного охлаждения.

Основные технические данные турбогенераторов серии Т представлены в табл. 25.33. Более мощные турбогенераторы (свыше 50 МВт) изготавливаются с непосредственным охлаждением обмоток. К ним относятся генераторы серий ТВФ, ТВВ, ТГВ и ТВМ, в которых для охлаждения активных частей ис-

пользуются различные хладагенты (см. табл. 25.28). Общий вид турбогенератора ТВВ-320-2 показан на рис. 24.37. Основные технические данные турбогенераторов с непосредственным охлаждением указаны в табл. 25.34а и 25.34б.

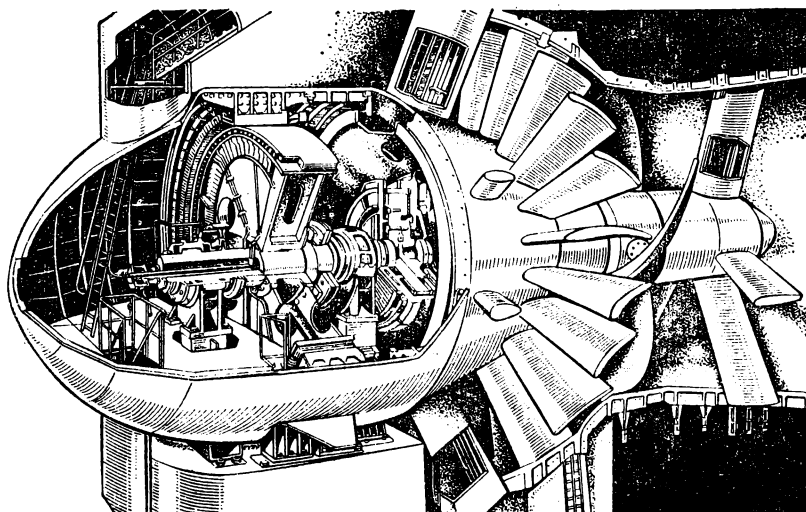


Рис. 25.10. Капсульный гидрогенератор СГКВ 911/145-116

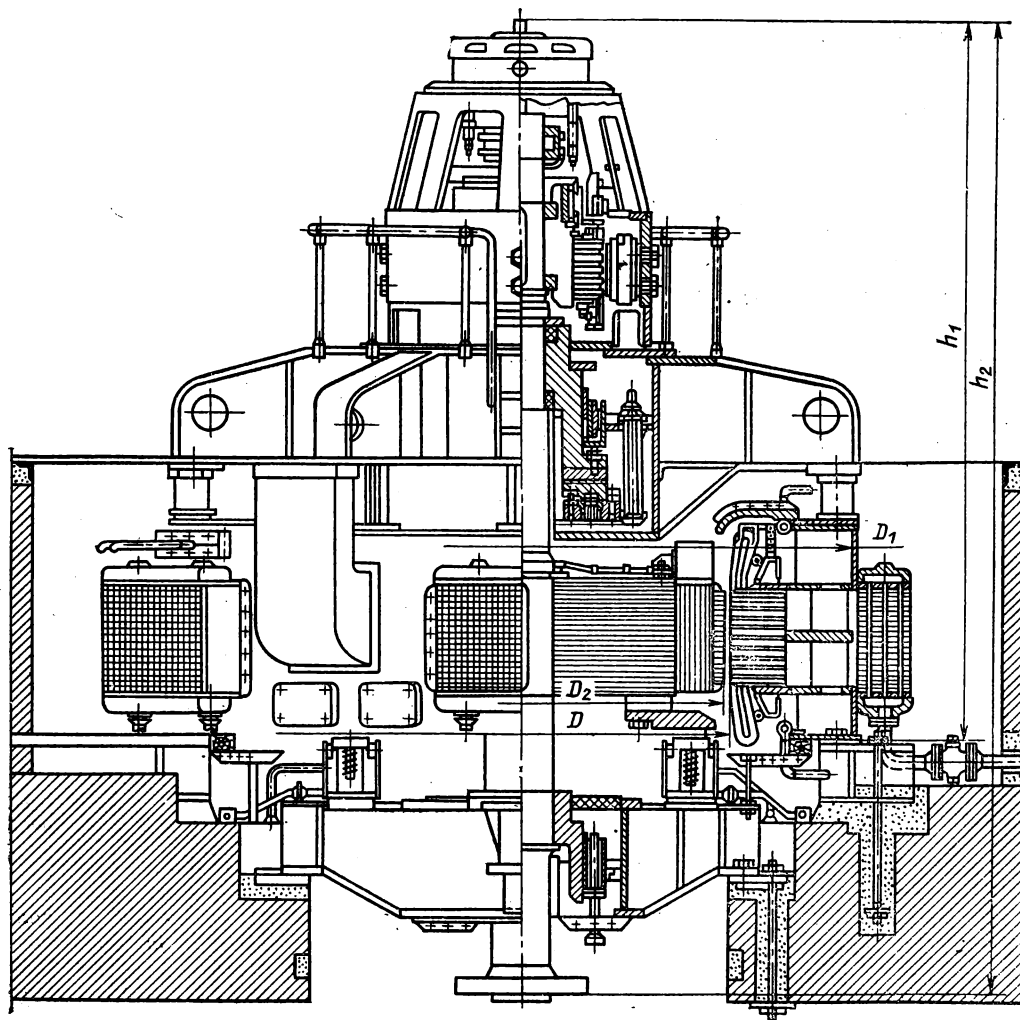


Рис. 25.11. Гидрогенератор в подвесном исполнении

25.11. ГИДРОГЕНЕРАТОРЫ

Значительная часть электроэнергии в СССР вырабатывается гидрогенераторами, установленными на гидроэлектростанциях. Относительно небольшая частота вращения ($n=50\div 600$ об/мин в зависимости от напора воды) определяет большие размеры (до 20 м в диаметре) и массы (до 1500 т) активных и конструктивных частей гидрогенераторов. Как правило, гидрогенераторы выполняются с вертикальным расположением вала. Исключение составляют гидрогенераторы с большой частотой вращения и капсульные гидрогенераторы (рис. 25.10), которые выполняются горизонтальными.

Характерной особенностью конструкции вертикальных гидрогенераторов является наличие мощного опорного подшипника, называемого подпятником. В зависимости от расположения подпятника вертикальные гидрогенераторы бывают подвесными (подпятник расположен над ротором, рис. 25.11) и зонтичными (подпятник расположен ниже остова ротора, рис. 25.12).

Крупные гидрогенераторы изготавливаются по индивидуальным заказам. Различие в буквенных обозначениях типов крупных гидрогенераторов связано с их конструктивными особенностями и с принятой системой охлаждения (см. табл. 25.29). За буквенным обозначением типа генератора следует дробное число, числитель которого равен внешнему диаметру сердечника статора, а знаменатель — длине сердечника статора в сантиметрах. Чис-

ло после черточки означает количество полюсов машины.

Представление о технических данных гидрогенераторов, выпущенных в СССР, можно получить из табл. 25.35.

25.12. СИНХРОННЫЕ КОМПЕНСАТОРЫ

Синхронные компенсаторы серий КС и КСВ (табл. 25.36) предназначены для работы в качестве генераторов реактивной мощности и служат для улучшения коэффициента мощности сети и регулирования ее напряжения. Синхронные компенсаторы серии КС выполняются закрытыми с косвенным воздушным охлаждением и предназначены для установки в закрытом помещении. Их вентиляция осуществляется по замкнутому циклу с охлаждением воздуха в водяных охладителях, расположенных в фундаментной яме. Компенсаторы серии КСВ (см. рис. 24.30) имеют закрытое исполнение и охлаждаются водородом при избыточном давлении 0,1 МПа в КСВ-50 и 0,2 МПа в КСВ-100 и КСВ-160. Водород охлаждается в охладителях, размещенных в торцевых частях статора. Асинхронный пуск компенсаторов осуществляется при пониженном с помощью реактора напряжении (до 40 % для КСВ-100 и КСВ-160 и до 50 % для всех остальных компенсаторов).

На базе компенсаторов серии КСВ в настоящее время разработаны компенсаторы типов КСВБ и КСВБО (см. табл. 25.30), возбуждаемые от бесщеточных возбудителей (см.

Таблица 25.35. Технические данные некоторых гидрогенераторов серий СГК, СГКВ, СВ, СВФ,

Тип	$S_{\text{ном}}$, МВ·А	$U_{\text{ном}}$, кВ	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\cos \varphi$	η , %	$\frac{n_{\text{уг}}}{n_{\text{ном}}}$	Индуктивные сопротивления, %						ОКЗ	$T_{\text{тр}}$, с
							x_d	x_q	x'_d	x''_d	x_2	x_0		
ВГС 440/69-28	9,4	10,5	214	0,8	96,1	2,15	97	—	32	21	—	—	1,1	—
СГКВ 480/115-64	20,0	3,15	93,8	1,0	96,3	2,81	194	—	57	45	45	—	—	—
ВГС 525/125-28	26,9	10,5	214	0,8	96,3	2,15	90	—	27	19	—	—	1,3	—
СГК2 538/160-70	19,0	3,15	85,7	0,92	96,0	2,33	133	—	56	44	—	—	0,87	—
СВ 712/227-24	306	15,75	250	0,85	98,18	1,76	165	—	42,4	27,9	28,4	9,8	—	8,65
СВО 733/130-36	45,6	10,5	166,7	0,9	97,4	2,1	105	—	33	30	33	—	1,0	—
ВГС 800/110-52	35	10,5	115,4	0,8	96,7	2,25	110	—	41	27	—	—	1,0	—
СВ 808/130-40	64,7	10,5	150	0,85	97,7	2,05	93	63	35	22	22,2	8,2	—	—
ВГСФ 930/233-30	294	15,75	200	0,85	98,1	1,8	147	—	33	19	20	—	0,75	—
ВГСВФ 940/235-30	353	15,75	200	0,85	98,2	1,8	131	85	38	24	25	—	0,81	9,7
СВ 1070/145-52	100	13,8	115,4	0,8	97,6	1,8	110	—	34	22	—	—	1,0	—
СВ 1130/140-48	117,7	13,8	125	0,85	98,0	2,15	91	59	26	21	22	10	—	—
ВГС 1190/215-48	282,5	15,75	125	0,85	98,4	1,8	122	78	38	25	—	—	0,87	—
ВГС 1260/147-68	97	13,8	88,25	0,85	97,5	1,8	76	—	28	21	—	—	1,47	—
СВФ 1285/275-42	711	15,75	142,8	0,9	98,3	1,96	158	97	43	29,5	30,5	15	—	8,2
СВ 1500/200-88	127,8	13,8	68,2	0,9	97,6	2,06	52	—	20	15	15	—	—	—
ВГС 1525/135-120	70,6	10,5	50	0,85	97,2	2,2	66	50	32	28	—	—	1,62	—
СВФ 1690/175-64	590	15,75	93,8	0,85	98,2	1,65	160	100	42	30	31	15	—	5,2
ВГДС 1025/245-40	236	15,75	150	$\frac{0,85}{0,95}$	98,4	1,6	142	96	45	32	33	—	0,758	12,8
СВО 1170/190-36	$\frac{209}{228}$	15,75	166,7	$\frac{0,85}{0,94}$	$\frac{97,8}{98,1}$	1,58	122	—	32	18	—	—	$\frac{0,87}{0,81}$	—
СВО 1120/190-32	$\frac{285}{290}$	15,75	187,5	$\frac{0,9}{1,0}$	$\frac{98,2}{98,4}$	1,5	102	—	32	17	—	—	1,0	—

Примечание. Для обратимых машин типов СВО и ВГДС в числителе указаны данные для ге режимов.

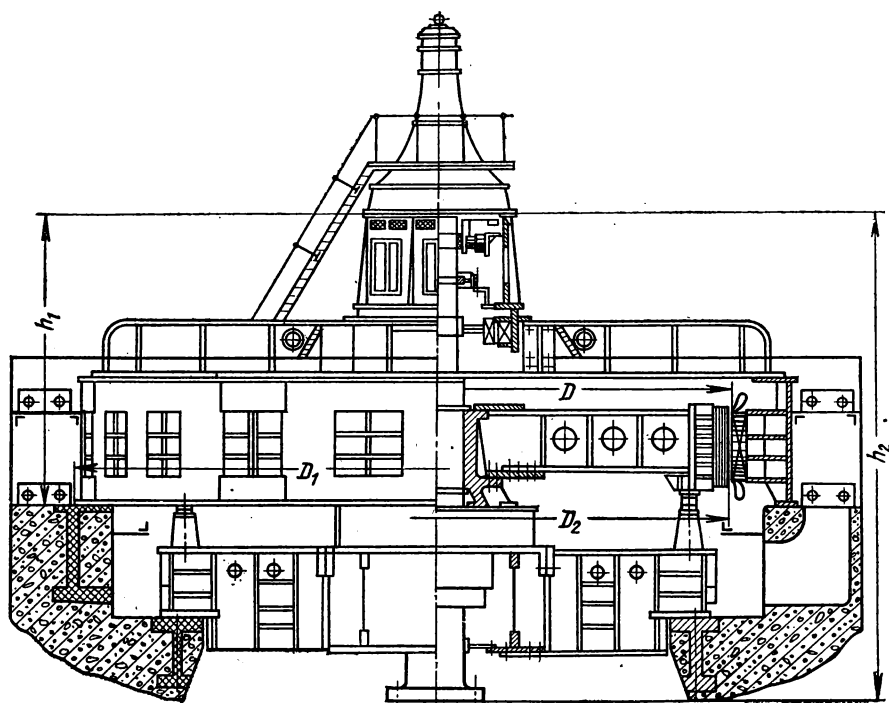


Рис. 25.12. Гидрогенератор в зонтном исполнении

§ 24.15), пристроенных с торцов компенсаторов. Компенсаторы типа КСВБО имеют реверсивное возбуждение (положительное и от-

СВО, ВГС, ВГСФ, ВГСВФ

Возбуждение		Исполнение	Масса, т		$J, \text{т} \cdot \text{м}^2$
$I_f, \text{А}$	$U_f, \text{В}$		ротора	общая	
436	185	Подвесное	52	108	100
950	295	Капсульное	62	170	162,5
1050	145	Подвесное	116	241	325
—	—	Капсульное	—	166	250
2400	310	Подвесное	388	818	2000
—	—	»	—	450	1270
1020	210	Зонтное	170	345	1450
1200	204	»	255	—	1875
1880	308	Подвесное	560	1150	5375
2450	300	»	648	1250	6625
—	—	Зонтное	—	700	6000
1300	191	»	—	—	7250
1500	370	»	650	1180	13 700
1435	355	»	384	784	9250
3500	530	»	935	1790	25 400
1820	380	»	765	1350	25 000
1300	480	»	500	850	18 300
3680	615	»	884	1650	46 750
1680	240	»	—	—	—
1500	210	»	600	1100	8000
—	—	»	—	950	7500
—	—	»	—	1130	9500

нераторного, а в знаменателе — для двигательного

рицательное). Положительное возбуждение осуществляется, как и для компенсатора КСВБ, от возбудителя ВБД160-830У1, отрицательное — от возбудителя ВБД0160-145У1, который питает дополнительную обмотку возбуждения, расположенную на полюсах ротора компенсатора.

25.13. СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И ДВИГАТЕЛИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Синхронные генераторы, общего назначения, предназначенные для сопряжения с двигателями внутреннего сгорания (дизелями) и другими двигателями, выпускаются в СССР в виде нескольких серий: ОС, ЕСС, ЕСС5, СГ2, СГД (10-й габарит), СГД2 и СГДС (15-й габарит).

Генераторы этих серий изготавливаются явнопольными, горизонтальными, на двух щитовых или стояковых подшипниках (кроме генераторов серии СГД2, которые имеют одноопорное исполнение (рис. 25.13), защищенными, с воздушным охлаждением в режиме самовентиляции.

Машины серий СГД и СГДС имеют электромашинную систему возбуждения. Возбудитель приводится во вращение с помощью клиноременной передачи (рис. 25.14).

Генераторы серий ОС, ЕСС, ЕСС5, СГ2 и СГД2 имеют вентильные системы самовозбуждения с автоматическим регулированием напряжения.

Таблица 25.36. Технические данные синхронных компенсаторов серий КС и КСВ

Тип	$S_{\text{ном}}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	Возбуждение				Масса, т		Потери, кВт	ОКЗ
				$U_f, \text{В}$	$I_{f\text{ном}}, \text{А}$	$I_{fx}, \text{А}$	$I_{fK}, \text{А}$	ротора	общая		
КС 16-6 КС 16-11	16 16	6,3 10,5	1080	110	590 580	240 220	280 300	18,5	49,7 50,2	360 370	0,88 0,75
КСВ 50-11 КСВ 100-11 КСВ 160-15	50 100 160	11 11 15,75	750 750 750	160 230 380	1160 1350 1600	300 405 500	700 730 890	46,5 77 110	144,5 220 303	800 1350 1750	0,4 0,52 0,53

Продолжение табл. 25.36

Тип	Пусковые характеристики			Индуктивные сопротивления					$T_f, \text{ c}$	Сопротивления обмоток при 15 °С, Ом		Момент инерции, т·м ²
	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{0,05}}{M_{\text{ном}}}$	x_d	x_q	x'_d	x''_d	x_0		r_a	r_f	
КС 16-6 КС 16-11	3 2,8	0,34 0,39	0,59 0,58	1,3 1,5	0,72 0,85	0,26 0,3	0,16 0,19	0,07 0,09	7,34 7,3	0,0073 0,022	0,13 0,13	4,0 4,0
КСВ 50-11 КСВ 100-11 КСВ 160-15	4,0 5,2 2,3	0,8 1,5 0,28	0,75 1,2 0,47	2,7 2,1 2,0	1,5 1,26 1,3	0,47 0,4 0,43	0,28 0,2 0,205	0,14 0,1 0,13	9,1 9,35 8,7	— — —	— — —	31,3 52,5 75

Примечания: 1. В общую массу компенсаторов КСВ не включены массы системы возбуждения и аппаратуры водородного охлаждения.

2. Технические данные синхронных компенсаторов серий КСВБ и КСВБО такие же, как и у компенсаторов серии КСВ.

3. Оптовая цена синхронных компенсаторов (без учета стоимости возбудителей, газоохладителей и аппаратуры водородного охлаждения) составляет: КСВБ-50-11—188 тыс. руб., КСВБО-50-11—250 тыс. руб., КСВБ-100-11—345 тыс. руб., КСВБО-100-11—410 тыс. руб.

Таблица 25.37. Технические данные некоторых генераторов серий ЕСС, ЕСС5, СГД, СГ2, СГД2, СГДС ($\cos \varphi = 0,8$; $f = 50 \text{ Гц}$)

Тип	$S_{\text{ном}}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$	ОКЗ	Возбуждение		$J, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	Масса, кг		Размеры, м (см. рис. 25. 14)			Цена, тыс. руб.
					$U_{f\text{ном}}, \text{В}$	$I_{f\text{ном}}, \text{А}$		ротора	общая	l_{30}	b_{10}	h	
ЕСС-52-4	6,25	1500	80,2	—	—	—	0,142	36	125	0,562	0,33	0,18	0,315
ЕСС-62-4	15	1500	86	—	—	—	0,35	65	238	0,693	0,39	0,20	0,405
ЕСС-82-4	37,5	1500	88	—	—	—	1,05	175	420	0,868	0,52	0,25	0,54
ЕСС-91-4	62,5	1500	90	—	—	—	1,87	185	590	0,933	0,60	0,315	0,64
ЕСС5-61-4	10	1500	84,7	—	—	—	0,25	48	160	0,698	0,39	0,20	0,27
ЕСС5-62-4	15	1500	85	—	—	—	0,35	65	189	0,742	0,39	0,20	0,30
ЕСС5-81-4	25	1500	86	—	—	—	0,725	103	300	0,793	0,52	0,25	0,355
ЕСС5-81-6	25	1000	86	—	—	—	1,15	125	300	0,793	0,52	0,25	0,355
ЕСС5-82-4	37,5	1500	87,5	—	—	—	1,05	125	360	0,87	0,52	0,25	0,39
ЕСС5-83-6	37,5	1000	88,2	—	—	—	1,675	175	360	0,87	0,52	0,25	0,41
ЕСС5-91-4	62,5	1500	89,3	—	—	—	1,875	185	490	0,935	0,645	0,315	0,46
ЕСС5-92-6	62,5	1000	89,6	—	—	—	2,85	229	540	0,935	0,645	0,315	0,485
ЕСС5-92-4	75	1500	90,5	—	—	—	2,3	212	545	0,935	0,645	0,315	0,485
ЕСС5-93-4	93,7	1500	91	—	—	—	—	—	605	0,99	0,60	0,315	0,56
СГД102-8	93,7	750	89	—	—	118,5	—	—	1070	1,2	0,72	0,375	1,49
СГД103-4	250	1500	92,3	—	—	129	—	—	1550	1,46	0,72	0,375	1,76
СГ2-85/18-12	156	500	90,5	0,7	27	145	29	—	1670	1,26	1,005	0,50	5,0
СГ2-85/18-10	200	600	91,3	0,7	29	156	29	—	1640	1,26	1,005	0,50	—
СГ2-85/29-12	250	500	91,9	0,8	36	147	45	—	2120	1,37	1,005	0,50	—
СГ2-74/25-6	313	1000	93	0,6	31	179	17	—	1600	1,33	0,89	0,45	4,8
СГ2-85/29-10	313	600	92,6	0,7	38	153	45	—	2140	1,37	1,005	0,50	—
СГ2-85/45-12	394	500	92,7	0,7	49	147	70	—	2750	1,5	1,005	0,50	5,97
СГД2-17-24-16	500	375	92	0,83	41	216	287	—	4400	1,485	1,96	0,315	—
СГД2-17-29-16	625	375	92,6	0,95	50	236	338	—	4950	1,545	1,96	0,315	—
СГД2-17-36-16	790	375	93,5	0,85	55	222	400	—	5450	1,605	1,96	0,315	9,6
СГД2-17-44-16	1000	375	94	0,9	61	241	488	—	6200	1,605	1,96	0,315	12,0
СГДС-15-30-8	1250	375	94,3	—	50	323	—	—	7300	—	—	—	14,7
СГДС-15-54-8	2000	375	95	—	69	320	—	—	11 600	—	—	—	24,5
СГДС-15-74-8	2500	375	95	—	70	306	—	—	13 700	—	—	—	27,6

Примечание. Генераторы серий ЕСС и ЕСС5 имеют напряжение 230 или 400 В, генераторы СГД2 и СГ2—400 В, генераторы СГ2—400 или 6300 В, генераторы СГДС—6300 В.

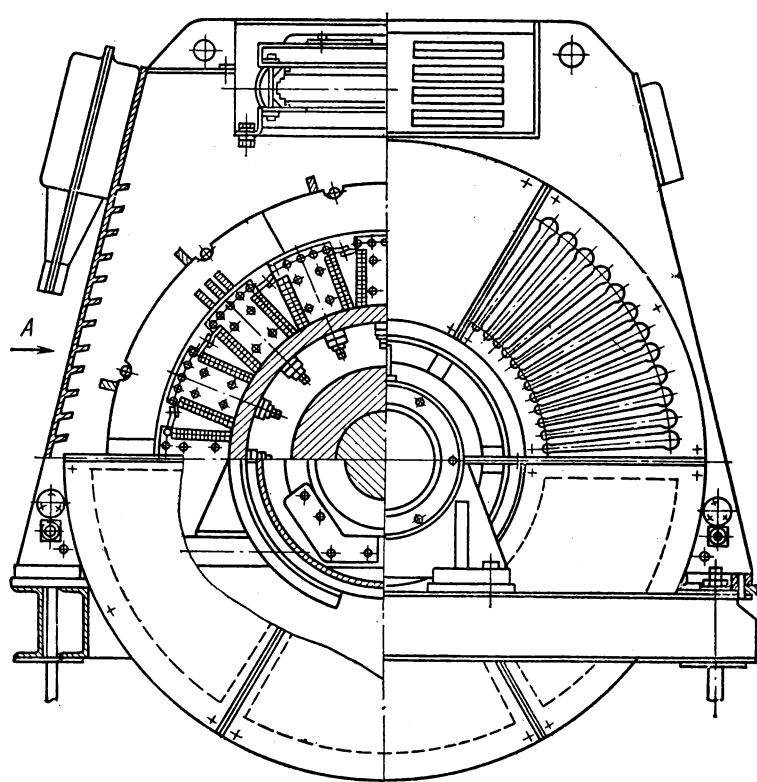
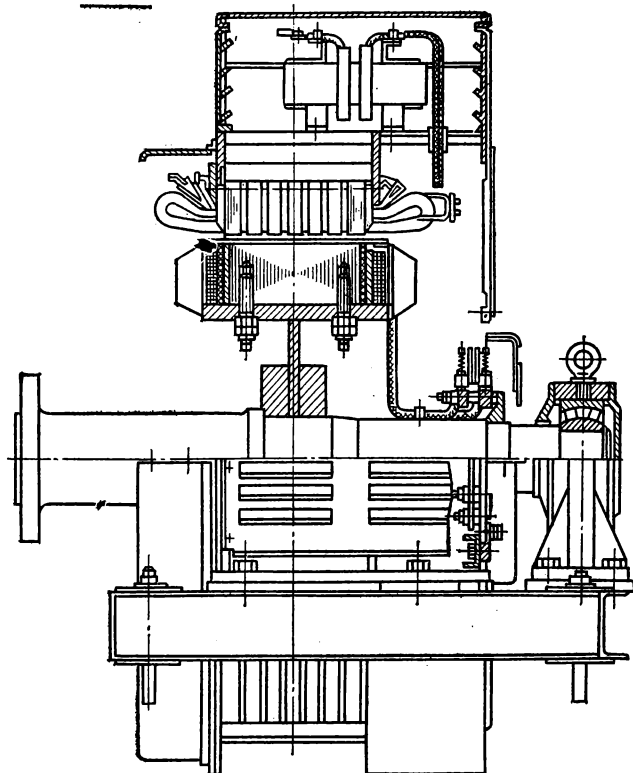
Вид А

Рис. 25.13. Синхронный генератор серии СГД2 с вентильной системой возбуждения

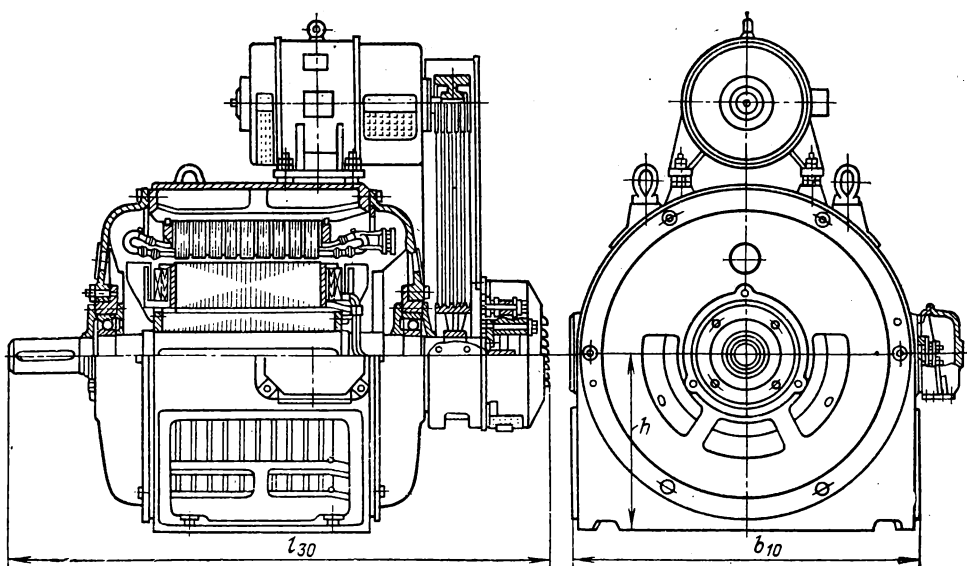


Рис. 25.14. Синхронный генератор серии СГД с электромашинным возбуждением

Технические данные некоторых синхронных генераторов этих серий приводятся в табл. 25.37. Генераторы серии СГД2 выпускаются на напряжения 400 и 6300 В. Данные для генераторов на 400 В незначительно отличаются от данных генераторов на 6300 В, которые приведены в табл. 25.37.

Для всех типов генераторов последнее число в структурном обозначении (однознач-

ное или двузначное) означает число полюсов машины.

Синхронные двигатели общего назначения применяются для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (вентиляторов, насосов, мельниц и др.). Они выпускаются в СССР в виде серий СД2, СДН2, СДН32.

Двигатели серии СД2 выполняются на

Таблица 25.38. Технические данные некоторых двигателей серий СД2, СДН2 и СДН32 (cos φ = 0,9 при перевозбуждении, 50 Гц)

Тип	P _{НОМ} , кВт	U _{НОМ} , В	n _{НОМ} , об/мин	η _{НОМ} , %	M _{max} /M _{НОМ}	Пусковые данные			Возбуждение		J, кг·м ²	Масса, т		Размеры, мм (см. рис. 25.14)			Цена, тыс. руб.
						I _П I _{НОМ}	M _П M _{НОМ}	M _{0,05} M _{НОМ}	U _{fНОМ} , В	I _{fНОМ} , А		ротора	общая	l ₃₀	b ₁₀	h	
СД2-85/18-12	132	380	500	90,9	1,7	4,5	1,0	0,8	25	137	29	—	1,67	1,26	1,005	0,5	4,4
СД2-85/29-12	200	380	500	92,4	1,7	5,0	1,1	0,9	32	129	45	—	2,12	1,37	1,005	0,5	—
СД2-85/29-10	250	380	600	93,2	1,7	5,5	1,2	1,1	33	133	45	—	2,14	1,37	1,005	0,5	5,14
СД2-85/40-10	315	6000	600	93,1	1,7	5,3	1,1	1,1	31	154	51	—	2,65	1,57	1,005	0,5	5,6
СД2-74/40-8	315	380	750	94,0	1,7	5,5	1,2	1,1	34	160	26	—	2,05	1,47	0,89	0,45	—
СД2-85/40-8	400	6000	750	93,9	1,7	5,5	0,9	1,3	33	161	48	—	2,70	1,57	1,005	0,5	5,3
СД2-85/47-8	500	6000	750	94,3	1,7	5,5	0,9	1,3	38	166	57	—	2,95	1,65	1,005	0,5	5,55
СД2-85/45-6	630	6000	1000	95,0	1,7	6,0	0,9	1,5	38	177	46	—	2,75	1,65	1,005	0,5	5,8
СД2-85/57-6	800	6000	1000	95,5	1,7	6,0	0,9	1,5	44	175	58	—	3,25	1,77	1,005	0,5	6,3
СД2-85/34-4	630	6000	1500	94,5	1,7	6,0	0,9	1,6	36	186	26	—	2,65	1,57	1,005	0,5	—
СД2-85/43-4	800	6000	1500	95,0	1,7	6,0	0,9	1,6	41	187	32	—	2,95	1,65	1,005	0,5	—
СД2-85/55-4	1000	6000	1500	95,5	1,7	6,0	0,9	1,6	47	183	40	—	1,77	1,005	0,5	—	
17-26-20	315	6000	300	91,0	2,6	4,5	0,9	1,0	41	277	275	1,8	4,7	2,09	1,6	0,63	—
17-31-20	400	6000	300	91,7	2,7	4,5	0,75	1,0	46	296	318	2,1	5,5	2,15	1,6	0,63	—
СДН32-20-49-20	3200	6000	300	96,0	1,8	4,5	0,7	1,2	118	302	5500	—	24,5	3,75	3,7	0,63	29,7
17-26-16	500	6000	375	92,5	2,1	4,6	0,9	1,1	46	296	275	1,8	4,8	2,09	1,6	0,63	—
17-31-16	630	6000	375	93,2	2,0	4,5	0,85	1,1	48	304	320	2,2	5,4	2,2	1,6	0,63	—
СДН32-19-39-16	1600	6000	375	95,3	2,1	6,5	0,9	1,6	77	280	2100	—	16,5	2,84	3,2	0,63	21,4
17-31-12	800	6000	500	94,3	1,9	4,7	1,0	1,1	46	298	310	2,2	5,6	2,21	1,6	0,63	—
СДН2-18-64-12	2500	6000	500	96,2	1,8	6,5	1,5	1,4	77	260	1750	—	17,0	3,13	2,3	0,63	20,7
16-56-10	1000	6000	600	95,3	1,9	5,4	0,8	1,4	44	274	223	2,9	6,5	2,51	1,52	0,63	10,8
16-59-8	1250	6000	750	95,7	1,7	5,8	1,0	1,5	44	291	203	2,9	6,7	2,58	1,52	0,63	10,5
17-71-6	3150	6000	1000	96,9	1,7	6,6	1,3	1,4	58	281	435	4,7	10,9	2,85	1,6	0,63	—
17-89-6	4000	6000	1000	97,1	1,7	7,0	1,4	1,4	65	279	525	5,6	12,7	3,03	1,6	0,63	—

Примечания: 1. Для двигателей 16-го и 17-го габаритов серий СДН2 и СДН32 указана только цифровая часть обозначения типа двигателя.

2. 18-го габарита изготовляют только двигатели серии СДН2, 19-го и 20-го — только двигатели серии СДН32.

двух щитовых подшипниках, защищенными, с воздушным охлаждением в режиме самовентиляции. Возбуждение осуществляется от тиристорного преобразователя, который питается от дополнительной обмотки якоря. Обозначение типа двигателей: числитель дроби — наружный диаметр сердечника статора; знаменатель — длина сердечника статора, см. последнее число — число полюсов машины.

Двигатели серий СДН2 и СДН32 выполняются на двух стояковых подшипниках. Возбуждение осуществляется от тиристорных возбуждателей серии ТЕ8-320. Двигатели серии СДН2 выполняются защищенными, с воздушным охлаждением в режиме самовентиляции, двигатели СДН32 — закрытыми, с принудительной вентиляцией по замкнутому циклу. Пуск двигателей — асинхронный от сети с номинальным напряжением, режим работы S1 (см. § 23.8). Структура обозначения (СДН3-2-XX-XX-XX): С — синхронный, Д — двигатель; Н — нормальный; 3 — закрытый; 2 — номер серии; XX — условное обозначение габарита (16—20); XX — длина сердечника статора, см; XX — число полюсов.

Технические данные некоторых типов синхронных двигателей общего назначения приводятся в табл. 25.38.

25.14. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТИПЫ КРУПНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

В настоящее время общей тенденцией развития тяжелого электромашиностроения является рост единичной мощности электроагрегатов. Увеличение единичной мощности турбо- и гидрогенераторов позволяет более полно использовать топливные и гидроресурсы, с наименьшими затратами осуществлять ввод новых генерирующих мощностей. Рост единичной мощности современных электрических машин может осуществляться за счет исполь-

зования новых, более качественных электротехнических и конструкционных материалов, применения более эффективных систем охлаждения, а также за счет внедрения конструкций, основанных на новых физических принципах.

Турбогенераторы. В последние годы как в нашей стране, так и за рубежом достигнуты большие успехи в турбогенеростроении. Так, в СССР освоен серийный выпуск турбогенераторов мощностью 500 и 800 МВт, 3000 об/мин, модернизированы с учетом последних достижений ранее освоенные машины мощностью до 300 МВт включительно. Внедряется единая серия двухполюсных турбогенераторов, показатели которых по техническому заданию должны соответствовать указанным в табл. 25.39 [25.3]. С ростом мощности электрических машин повышаются требования к их надежности. По техническому заданию степень готовности турбогенераторов единой серии должна быть не ниже 99,5 %.

В СССР с 1976 г. эксплуатируется один из крупнейших в мире двухполюсный турбогенератор мощностью 1200 МВт. Генератор выполнен с непосредственным охлаждением обмотки статора водой и обмотки ротора водородом. Аналогичные результаты достигнуты ведущими зарубежными фирмами. Так, в ФРГ и Швейцарии созданы двухполюсные турбогенераторы мощностью 1200 МВ·А, а в США — генератор мощностью 1120 МВ·А.

Непрерывный рост доли АЭС в общей структуре генерирующих мощностей требует создания мощных четырехполюсных турбогенераторов. В СССР созданы турбогенератор мощностью 500 МВт с полным водяным охлаждением (ТГВ-500-4) и турбогенератор мощностью 1000 МВт с охлаждением обмотки ротора водородом и обмотки статора водой. Во Франции изготовлен крупнейший четырехполюсный турбогенератор 1480 МВт, в ФРГ — генераторы мощностью 1360 и 1200 МВт. Ана-

Таблица 25.39. Параметры и показатели турбогенераторов единой серии

$P_{\text{НОМ}}, \text{ МВт}$	63	125	220	320	500	800
$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$	0,8	0,8	0,85	0,85	0,85	0,9
$U_{\text{НОМ}}, \text{ кВ}$	6,3/10,5	10,5	15,75	20	20	24
$\eta, \%$	98,3—98,4	98,4—98,5	98,6—98,7	98,7—98,8	98,7—98,8	98,75—98,85
ОКЗ	0,47	0,42	$\geq 0,4$			
$x_d \text{ внас.}, \%$	≤ 35					
Расход материалов, кг/(кВ·А)	1,1—1,2	1,0—1,1	0,8—0,85	0,7—0,75	0,5—0,65	0,5—0,58
Статическая перегружаемость	1,7	1,7	1,65	1,6	1,6	1,5

логичные по классу четырехполюсные турбогенераторы изготавливаются в США.

Дальнейшее увеличение единичной мощности возможно за счет совершенствования системы охлаждения, например применения полного водяного охлаждения, а также за счет освоения производства роторных поковок диаметром 1,35—1,4 м, длиной до 11 м [25.3]. В настоящее время в СССР созданы и эксплуатируются два турбогенератора с полным водяным охлаждением мощностью 800 МВт, 3000 об/мин (ТЗВ-800-2) [25.4].

Предполагается, что в ближайшие годы мощность двухполюсных турбогенераторов может быть доведена до 1400—1600 МВт, а четырехполюсных — до 1600—2000 МВт [25.5].

С ростом единичных мощностей атомных реакторов, а также с перспективами создания термоядерных реакторов возникнет потребность увеличения единичных мощностей турбогенераторов до 2000—3000 МВт. Создание сверхмощных турбогенераторов с высокими технико-экономическими показателями возможно только на базе разработки принципиально новых конструкций и систем охлаждения.

В последние годы ведется большая работа по созданию криотурбогенераторов со сверхпроводящей обмоткой возбуждения (СПО). Эти генераторы принципиально отличаются от турбогенераторов обычного типа. В наиболее распространенной конструкции криотурбогенераторов ротор представляет собой вращающийся криостат. СПО устанавливается в полом немагнитного цилиндра, окруженном, как правило, двумя или более тепловыми экранами. Тепловые экраны, необходимые для исключения теплопритока к СПО, представляют собой вакуумированные камеры, образованные коаксиальными цилиндрическими оболочками. Все элементы конструкции ротора выполняются из немагнитных материалов (титановые сплавы или немагнитные стали), имеющих при низкой рабочей температуре низкую теплопроводность. В качестве криогенной жидкости используется гелий, который подается в ротор через полый вал. Тепловые экраны играют одновременно роль электромагнитных экранов, защищающих СПО от действия асинхронных полей. Иногда для этих целей на роторе устанавливаются дополнительные электромагнитные экраны.

Применение сверхпроводимости дает возможность во много раз увеличить МДС обмотки возбуждения и создать в зоне обмотки статора магнитное поле с индукцией 2—5 Тл. При таких полях нет необходимости укладывать обмотку статора в пазы ферромагнитного сердечника. Сердечник статора криотурбогенераторов представляет собой цилиндрический ферромагнитный экран, защищающий внешнее пространство вокруг машины от действия сильных магнитных полей, на внутренней поверхности которого уложена обмотка переменного тока. С целью уменьшения добавочных потерь эффективный стержень обмотки статора выполняют из формованных проводников, каждый из которых состоит из множества скрученных между собой элементарных очень тонких проводников (типа литца). Масса криотурбогенераторов мощ-

Таблица 25.40. Сравнительные данные криотурбогенератора и обычного турбогенератора с водородным охлаждением

Параметр	Турбогенератор	
	с водородным охлаждением	со сверхпроводящей обмоткой
$S_{\text{ном}}$, МВ·А	353	353
$U_{\text{ном}}$, кВ	20	20
$\cos \varphi_{\text{ном}}$	0,85	0,85
A , А/м	138 000	313 000
$B_{\delta \text{ ном}}$, Тл	0,835	1,0
D , м	1,265	—
$D_{\text{ср}}$, м	—	1,12
l_1 , м	6	2,3
ОКЗ	0,624	1,76
Коэффициент использования кВ·А/(м ³ ·об/мин)	12,2	55,5
Масса генератора, т	350	100
КПД, %	98,6	99,3
x_d'' , %	25,8	42,5
x_q'' , %	17,3	24,0

Примечание. $D_{\text{ср}}$ — средний диаметр расположения обмотки статора криотурбогенератора.

ностью 2000—3000 МВт почти в 3 раза меньше массы генераторов обычного типа, а активная длина меньше на 60—70 %. При этом (за счет отсутствия потерь в обмотке возбуждения) КПД возрастает примерно на 0,5 %. Хотя основные преимущества криотурбогенераторов проявляются при очень больших мощностях, заметный эффект можно получить и для генераторов средней мощности [25.7] (табл. 25.40).

Основные трудности на пути создания криотурбогенераторов связаны с конструкцией ротора. Такие проблемы, как создание надежной тепловой защиты СПО, создание уплотнений, предотвращающих утечки гелия, обеспечение заданного распределения гелия во внутренних камерах ротора, устранение вибраций ротора и др., еще далеки от своего окончательного решения. Сложности связаны также с надежным креплением обмотки статора, находящейся в зоне сильных полей и подверженной значительным механическим усилиям.

Преодоление технических трудностей и решение научных проблем, связанных с разработкой точных методов расчета сверхпроводящих машин, позволят в дальнейшем создать сверхмощные криотурбогенераторы.

В СССР проведены испытания криотурбогенератора типа КТГ-20 мощностью 20 МВ·А, 3000 об/мин [25.7], имеющего следующие основные технические данные [25.8]: $U_{\text{ном}} = 6,3$ кВ; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$; $I_{f \text{ ном}} = 1610$ А; $\eta = 98,2$ %; $x_{*d} = 0,333$; $x_{*ad} = 0,095$; ОКЗ = 3,0; $x_{*d} = 0,262$; $x_{*d}'' = 0,159$; $x_{*q}'' = 0,162$; $x_{*q} = 0,238$; $x_{*f} = 0,122$. Удельный расход материалов — 0,95 кг/(кВ·А).

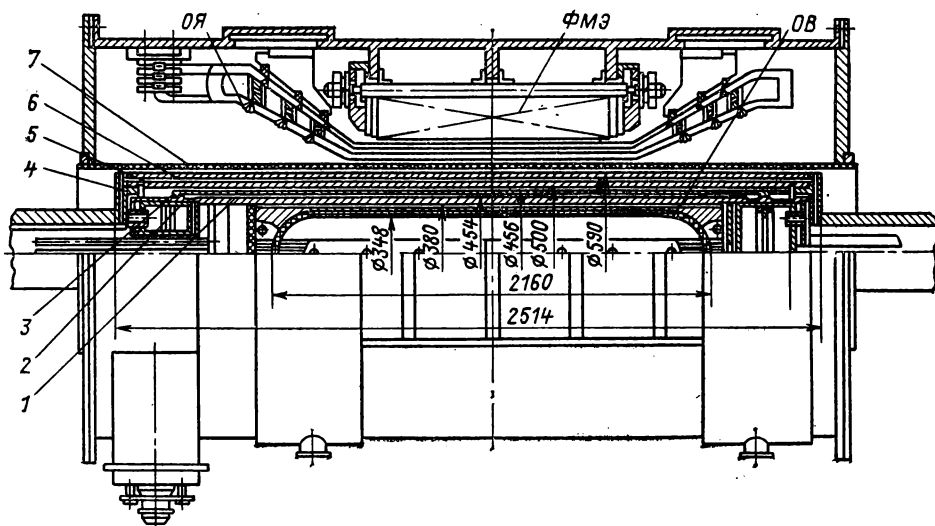


Рис. 25.15. Принципиальная конструкция криогенного турбогенератора типа КТГ-20:

ОВ — обмотка возбуждения; ОЯ — обмотка якоря (статора); ФМЭ — ферромагнитный экран; 1 — бандажный цилиндр; 2 — тепловые мосты; 3 — тепловой экран; 4 — хвостовины с фланцами; 5 — электромагнитный экран; 6 — несущая оболочка; 7 — изоляционный цилиндр

Принципиальная конструкция турбогенератора КТГ-20 показана на рис. 25.15. Катушки обмотки возбуждения (ОВ) намотаны прямоугольным проводом $2 \times 3,5$ мм, состоящим из 3600 жил из сплава Nb—Ti, заключенных в медную матрицу. Бандажный цилиндр 1, выполненный заодно с тепловыми мостами 2, изготовлен из немагнитной стали и воспринимает центробежные и электромагнитные усилия, действующие на обмотку возбуждения. Несущей оболочкой 6 является цилиндр из титанового сплава, на котором закреплен медный электромагнитный экран 5. Охлаждение ротора осуществляется по замкнутому циклу при подаче гелия в ротор. Теплоизоляцией ротора являются два слоя вакуумной изоляции между бандажным цилиндром и тепловым экраном 3 и между тепловым экраном и несущей оболочкой.

Объем статора отделен от ротора изоляционным цилиндром 7 из стеклопластика и заполнен фреоном, являющимся хладагентом для непосредственного охлаждения обмотки статора.

Проведенные экспериментальные исследования показали работоспособность генератора типа КТГ-20.

В настоящее время в СССР и ведущие зарубежные фирмы приступили к созданию криотурбогенераторов мощностью 300—500 МВт.

Гидрогенераторы. Конструкция современных гидрогенераторов во многом определяется системой охлаждения. Единичные мощности гидрогенераторов с косвенным воздушным охлаждением достигли предельных значений. В наиболее мощных гидрогенераторах, созданных в последнее время в СССР для Красноярской ГЭС (590 МВ·А, 90 об/мин) и Саяно-Шушенской ГЭС (711 МВ·А, 142 об/мин) применено непосредственное ох-

лаждение обмотки статора водой и форсированное охлаждение обмотки ротора воздухом. Перспективным направлением с точки зрения увеличения единичной мощности гидрогенераторов является применение полного водяного охлаждения. В СССР изготовлен генератор мощностью 353 МВ·А, 200 об/мин с водяным охлаждением обмоток статора и ротора и воздушным охлаждением сердечника статора для Нурекской ГЭС, создается генератор мощностью 667 МВ·А, 167 об/мин с полным водяным охлаждением для Роугунской ГЭС. За рубежом также имеется опыт применения полного водяного охлаждения в гидрогенераторостроении. В Швеции создан генератор мощностью 190 МВ·А, 375 об/мин. Предполагается, что применение полного водяного охлаждения позволит в дальнейшем увеличить единичную мощность гидрогенераторов до 1000 МВт.

В последние годы во многих странах США, Японии, ФРГ и др. получает развитие строительство мощных гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), предназначенных для покрытия пиковых нагрузок. Для ГАЭС применяются обратимые гидрогенераторы-двигатели. В СССР сейчас ведется строительство крупной Загорской ГАЭС, на которой будут установлены обратимые гидрогенераторы-двигатели ВГДС 1025/245-40 мощностью 200 МВт, 150 об/мин.

Синхронные компенсаторы. В настоящее время в СССР освоен серийный выпуск синхронных компенсаторов с водородным охлаждением мощностью 160 МВ·А. Применение полного водяного охлаждения позволило шведской фирме создать синхронный компенсатор мощностью 345 МВ·А, 900 об/мин. В СССР также ведутся работы по созданию синхронных компенсаторов с водяным охлаждением мощностью 350 МВ·А. Применение водяного охлаждения дает возможность вы-

полнить эти машины в габаритах синхронных компенсаторов с водородным охлаждением мощностью 160 МВ·А.

25.15. СИНХРОННЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ, ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ И РЕАКТИВНЫЕ

Основные особенности. Классификация

В зависимости от конструкции ротора синхронные микродвигатели могут быть разделены на: 1) двигатели с постоянными магнитами (рис. 25.16, а), 2) гистерезисные двигатели (рис. 25.16, б), 3) реактивные двигатели (рис. 25.16, в). Микродвигатели с обмоткой возбуждения постоянного тока почти не выпускаются.

Синхронные микродвигатели могут быть обычными — с частотой вращения ротора, равной частоте вращения поля, тихоходными — с частотой вращения, значительно меньшей частоты вращения поля (двигатели с электромагнитной редукцией или с волновым или катящимся ротором).

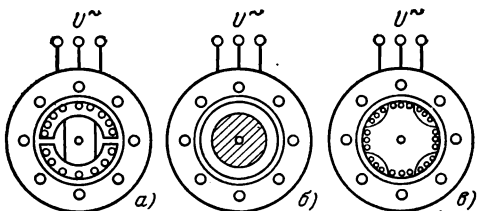


Рис. 25.16. Конструктивные схемы синхронных микродвигателей

Синхронные микродвигатели, так же как и асинхронные, выполняются либо трехфазными, либо однофазными, либо универсальными. В однофазных двигателях, т.е. двигателях, питающихся от однофазных сетей, необходимое для работы двигателя вращающееся магнитное поле чаще всего создается с помощью вспомогательной обмотки и конденсатора, реже — с помощью короткозамкнутых витков на полюсах (двигатели с экранированными полюсами).

Механические свойства синхронного микродвигателя обычно характеризуются тремя вращающимися моментами: пусковым, развиваемым при пуске (при $n=0$); моментом входа в синхронизм — максимальным моментом сопротивления, при котором ротор двигателя еще втягивается в синхронизм; моментом выхода из синхронизма — максимальным моментом, развиваемым ротором при синхронной частоте вращения (при $n=n_c$).

Синхронные двигатели с постоянными магнитами

В синхронном двигателе с постоянными магнитами магнитное поле ротора создается за счет постоянных магнитов. Двигатель не имеет скользящих контактов, не требует источника питания постоянного тока для воз-

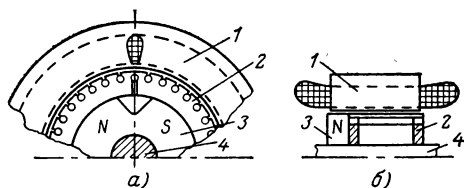


Рис. 25.17. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами:

а — с ротором радиальной конструкции; б — с ротором аксиальной конструкции; 1 — статор; 2 — асинхронная часть ротора с короткозамкнутой обмоткой; 3 — постоянный магнит; 4 — вал

буждения и в то же время по своим пусковым и рабочим свойствам весьма близок к двигателям с обмоткой возбуждения постоянного тока.

Ротory двигателей с постоянными магнитами (рис. 25.17) сочетают в себе элементы синхронных двигателей — постоянные магниты — и элементы асинхронных двигателей — короткозамкнутую обмотку, выполненную в виде беличьей клетки.

При пуске в ход (рис. 25.18) двигатель работает как асинхронный — его вращающий момент создается за счет взаимодействия вращающегося магнитного поля с наведенными им токами в короткозамкнутой обмотке ротора. При достижении частоты вращения, близкой к синхронной, ротор за счет взаимодействия поля постоянных магнитов с вращающимся магнитным полем статора втягивается в синхронизм и в дальнейшем вращается синхронно с полем статора.

Максимальный момент сопротивления на валу двигателя, при котором ротор еще втягивается в синхронизм, называется моментом входа $M_{вх}$. Максимальный момент, который развивает ротор двигателя в синхронном режиме, называется моментом выхода $M_{вых}$.

В отличие от синхронных двигателей с обмотками возбуждения на полюсах ротора, которые при пуске двигателей в ход не питаются от сети постоянного тока, а следовательно, и не создают магнитного поля полюсов, в двигателях, возбуждаемых постоянными магнитами, полюсы постоянных магнитов ротора создают магнитное поле как при пуске в ход — в асинхронном режиме, так и при работе — в синхронном режиме. При пуске в ход (при $n \neq n_c$) в результате взаимодей-

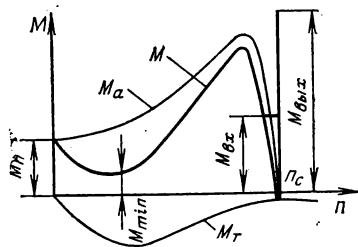


Рис. 25.18. Механические характеристики синхронного микродвигателя с постоянными магнитами в пусковом — асинхронном режиме:

M_a — двигательный асинхронный момент; M_T — тормозной генераторный момент; M — результирующий момент

Таблица 25.41. Основные технические данные синхронных микродвигателей с постоянными магнитами типов Д-22-1500/750, ДС-10-1500М, ДС-12

Тип двигателя	Число фаз	f , Гц	n , об/мин	$U_{\text{ном}}$, В	$P_{\text{ном}}$, В	$I_{\text{ном}}$, А	η , %	$\cos \varphi$	$\frac{M_{\text{вх}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{вых}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	C_p , мкФ	Масса, кг	Оптовая цена, руб.
ДС-22-1500/750	3	50	1500	380	16	0,14	50	0,5	1,15	1,44	2,88	—	—	3,4	122
ДС-10-1500М	3	50	750	380	10	0,13	39	0,53	1,23	1,38	2,3	—	—	2	—
	2	50	1500	220	13	0,175	40	0,44	—	2	3,5	3,5	—	2	—
ДС-12	2	50	1500	220	10	0,2	27,7	0,821	—	1,8	1,25	2,5	—	2	—
ДС-12А	2	50	3000	127	0,25	0,03	7,2	0,92	1,75	1,83	1,75	1,65	0,6	0,3	—
ДС-12Б	2	50	3000	40	0,25	0,12	7,2	0,73	1,75	1,88	1,75	1,65	0,8	0,3	—
ДС-12В	2	60	3600	115	0,25	0,03	7,2	0,99	2	2,15	2,0	1,65	0,5	0,3	—

вия магнитного поля полюсов ротора с навешенными ими токами в обмотке статора, которую можно считать замкнутой накоротко (сопротивление питающей сети, как правило, близко к нулю), в двигателях, возбуждаемых постоянными магнитами, возникает тормозной вращающий момент M_T (рис. 25.18), который противодействует приводящему ротор во вращение асинхронному моменту M_a . Для пуска в ход синхронного двигателя с постоянными магнитами необходимо, чтобы в асинхронном режиме асинхронный момент был больше тормозного момента M_T . В этом случае результирующий момент $M = M_a - M_T$ будет положительным (больше нуля) и двигатель сможет запускаться.

В настоящее время получили распространение две конструкции роторов с постоянными магнитами. В первой из них (рис. 25.17, а) постоянный магнит и короткозамкнутая обмотка располагаются радиально, во второй (рис. 25.17, б) — аксиально. Роторы второй конструкции обычно применяются для многополюсных машин с малым внутренним диаметром статора, когда выполнение лучшей в электромагнитном отношении первой конструкции затруднительно.

Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами появились сравнительно недавно, но уже получили достаточное распространение вследствие их хороших пусковых и рабочих свойств. Эти двигатели надежны в работе, имеют высокую равномерность мгновенной частоты вращения, высокие КПД и $\cos \varphi$ (табл. 25.41).

Тихоходные многополюсные синхронные микродвигатели с постоянными магнитами

Кроме обычных синхронных микродвигателей с постоянными магнитами, у которых число пар полюсов не превосходит двух-трех, в настоящее время выпускаются в больших количествах многополюсные тихоходные синхронные микродвигатели малых мощностей, предназначенные для работы от однофазных сетей в регистрирующих и самопишущих приборах, реле времени, счетчиках, программных механизмах, в самых различных автоматических устройствах. Потребность в таких двигателях составляет миллионы штук в год. До недавнего времени в СССР для этих целей выпускались лишь два типа микродвигателей.

Это синхронные многополюсные двигатели с постоянными магнитами типа ДСМ (рис. 25.19) и синхронные двухполюсные реактивно-гистерезисные микродвигатели типов ДСД, ДСДР (см. рис. 25.28, табл. 25.44). В настоящее время двигатели этих типов заменяются недавно разработанными и быстро внедряющимися в производство многополюсными синхронными микродвигателями с постоянными магнитами типов ДСО, ДСОР, ДСК, ДСКР.

У микродвигателей типа ДСМ (рис. 25.19), питающихся от однофазных сетей переменного тока, вращающееся магнитное поле создается за счет экранирования короткозамкнутыми контурами частей полюсов. Вращение ротора в заданном направлении обеспечивается специальными устройствами, блокирующими обратный ход. Двигатели серии ДСМ рассчитаны на работу от сетей переменного тока 50 Гц. Они выпускаются на номинальные напряжения 220, 127, 36, 24, 12 В. Обычно двигатели снабжаются механическими редукторами, обеспечивающими частоты вращения выходного вала редуктора 2, 60, 1/300 об/мин. Номинальные данные базового двигателя (без редуктора) типа ДСМ-375 представлены в табл. 25.42. Двигатели типа ДСМ (без

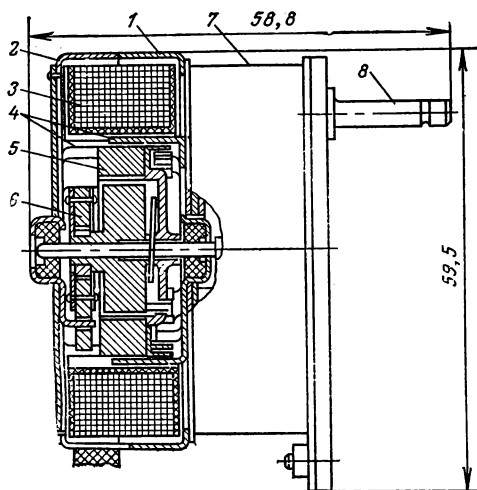


Рис. 25.19. Однофазный микродвигатель типа ДСМ: 1, 2 — соответственно задняя и передняя части магнитопровода; 3 — однофазная обмотка возбуждения; 4 — клювообразные полюсы; 5 — ротор; 6 — муфта, обеспечивающая одностороннее вращение; 7 — редуктор; 8 — выходной вал

Таблица 25.42. Основные технические данные однофазных синхронных микродвигателей типов ДСМ-375 и ДСО32-0,1-0,375

Основные параметры	Двигатель ДСМ-375	Двигатель ДСО32-0,1-0,375
Напряжение питания, В	220±22	220±33
Потребляемая мощность, Вт, не более	3	2
Частота вращения ротора, об/мин	375	375
Номинальный момент, Н·см	0,08	0,1
Максимальный момент в синхронном режиме, Н·см	0,08	0,12
Масса, кг, не более	0,13	0,065
Габаритные размеры $\varnothing \times L$, мм	$\varnothing 55 \times 26$	$\varnothing 32 \times 20$
Конструкторский объем, см ³	36	15
Использование по массе M_H/G , Н·см/кг	0,615	1,54
Использование по объему M_H/V , Н·см/см ³	0,0022	0,0066
Срок службы, ч	8800	16 000
Вероятность безотказной работы	0,96 при 2000 ч	0,9 при 16 000 ч
Средний уровень звука, дБ·А	53	30
Эффективное значение вибрационной скорости, мм/с	1,2	0,45
Время вхождения в синхронизм, с	0,3	0,08
Температурный диапазон работы, °С	0—50	—60÷+60
Оптовая цена, руб.	1,5	1,21

редуктора и с редуктором) пока еще выпускаются. Они выпускались ранее в очень больших количествах и в настоящее время работают в самых различных устройствах, но выпуск их сокращается в связи с началом выпуска и быстрым расширением производства новых типов микродвигателей с постоянными магнитами, превосходящих двигатели типа ДСМ по многим показателям. Это двигатели с постоянными магнитами типов ДСО, ДСОР, ДСК, ДСКР [25.14].

Тихоходные однофазные микродвигатели типов ДСО, ДСОР

Двигатель типа ДСО (двигатель синхронный однофазный) — это многополюсный двигатель, рассчитанный для работы от однофазных сетей переменного тока частотой 50 или 60 Гц с надежным бдонаправленным пуском и вращением и предназначенный для работы в различных промышленных и бытовых приборах.

Габаритные, установочные и присоединительные размеры двигателей ДСО двух исполнений представлены на рис. 25.20.

Конструкция двигателя ДСО (рис. 25.21) весьма проста и технологична. Статор двигателя состоит из намотанной в виде кольца катушки 7, залитой и соответствующим образом отформованной литевой пластмассой. Отформованная катушка 7 является основой двигателя. Справа и слева к катушке прилегают магнитопроводы 4, имеющие по восемь ключообразных полюсов 6 определенной длины, направленных аксиально и полученных путем неполной выштамповки и отгибки частей 10 правого и левого магнитопроводов.

Полюсы одного магнитопровода располагаются между полюсами другого магнитопровода.

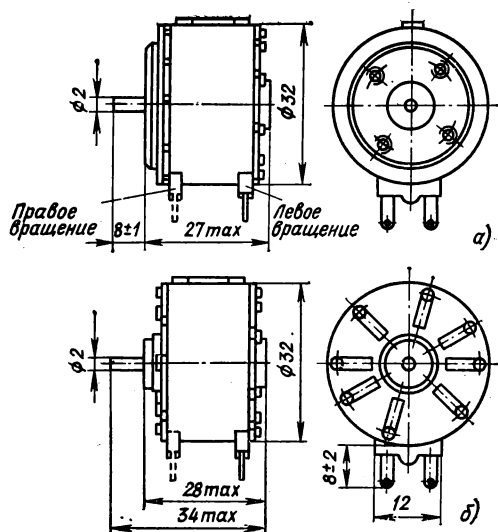


Рис. 25.20. Габаритные, установочные и присоединительные размеры синхронных однофазных тихоходных двигателей типа ДСО32 с постоянными магнитами:

а — исполнение 1; б — исполнение 2

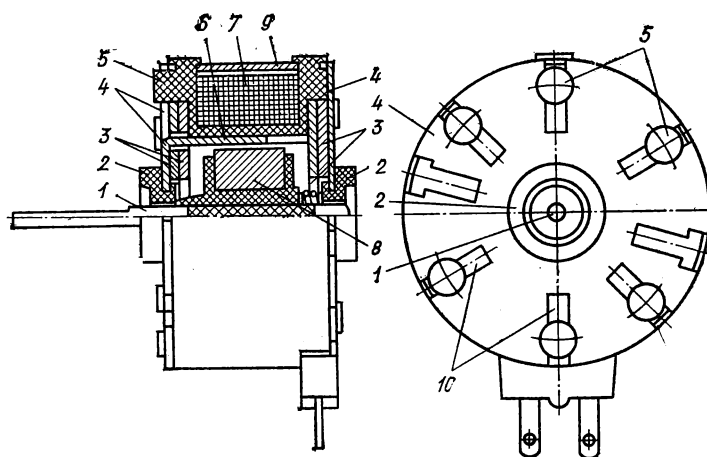


Рис. 25.21. Однофазный многополюсный тихоходный синхронный микродвигатель с постоянными магнитами и экранированными полюсами типа ДСО32-0,1-0,375

Магнитопроводы одновременно служат подшипниковыми щитами. В их центральных отверстиях располагаются подшипники скольжения 2, выполненные путем заливки из литьевого сополимера.

Медные пластины 3 особой конфигурации, прилегающие изнутри к правому и левому магнитопроводам (по 2 шт. к каждому), экранируют определенную часть полюсов статора, выполняя роль короткозамкнутых витков, что обеспечивает при питании катушки статора переменным током создание вращающегося в пространстве магнитного поля (не кругового, а эллиптического).

Магнитный поток, созданный обмоткой статора, замыкаясь вокруг нее, проходит по левому магнитопроводу, его клювообразным полюсам, цилиндрическому магниту ротора 8, клювообразным полюсам правого магнитопровода, правому магнитопроводу и замыкается по внешнему магнитопроводу 9, соприкасающемуся с обоими торцевыми магнитопроводами 4.

Цилиндрический ротор двигателя состоит из кольцевого ферритобариевого магнита 8 марки М1Б1, опрессованного литьевым сополимером на стальном валу 1. Цилиндрический магнит ротора имеет 16 полюсов, полученных путем радиального намагничивания.

Двигатель имеет закрытое исполнение с одним выходным концом вала.

Подшипниковые щиты, которыми являются торцевые магнитопроводы, и внешний магнитопровод закрепляются на основной части двигателя — катушке, залитой литевой пластмассой, с помощью цилиндрических пластмассовых выступов (шпилек) 5, концы которых после сборки двигателя оплавляются.

Конструкция двигателя весьма технологична, что очень важно при массовом производстве двигателей. Стоимость одного двигателя составляет всего 1 руб. 21 коп.

Технические данные двигателя типа ДСО32-0,1-0,375 представлены в табл. 25.42. Числа, стоящие после названия двигателя ДСО, означают: первая (32) — наружный диаметр в мм, вторая (0,1) — пусковой и номинальный мо-

мент, Н·см, третья (0,375) — частота вращения, тыс. об/мин.

Двигатели ДСО32 выпускаются на номинальные напряжения 12, 24, 40, 110 (127), 220 В. Для работы при напряжениях свыше 220 В рекомендуется включать последовательно с двигателем гасящие напряжение элементы (резисторы или конденсаторы). Режим работы двигателей ДСО продолжительный (S1 по ГОСТ 183.74) или повторно-кратковременный с частыми пусками с продолжительностью включения 60 % и частотой включения 3600 в час. Направление вращения левое или правое в зависимости от исполнения.

Двигатели ДСО32 выпускаются и для работы от сети с частотой 60 Гц. В этом случае они маркируются так: ДСО32-0,08-0,450.

Двигатель типа ДСОР32 — это двигатель типа ДСО32 с присоединенным к нему понижающим механическим редуктором, имеющим то или иное передаточное число. Внешний вид двигателя ДСОР32 и основные размеры представлены на рис. 25.22. Основные их технические данные приведены в табл. 25.43.

В настоящее время вместо редуктора, представленного на рис. 25.22 и заимствованного у двигателя типа АСМ (см. рис. 25.19),

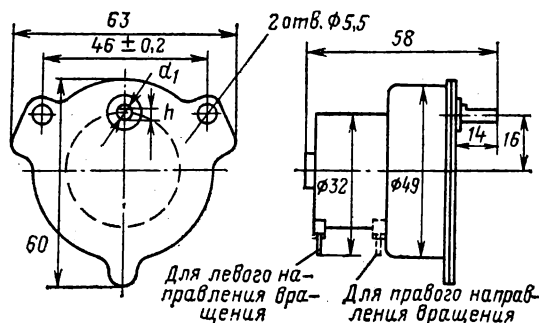


Рис. 25.22. Внешний вид и основные размеры микродвигателя ДСОР32 с механическим понижающим редуктором старого типа, аналогичным редуктору двигателя ДСМ (см. рис. 25.19)

Т а б л и ц а 25.43. Основные технические данные однофазных синхронных тихоходных микродвигателей с пристроенным редуктором типа ДСОР32

Тип двигателя	Частота вращения f , Гц	$n_{\text{ном}}$, об/мин	Предаточное число редуктора	$M_{\text{п}} (M_{\text{ном}})/M_{\text{max}}$, Н·см, не менее	Потребляемая мощность, Вт/(В·А)	Масса, кг	Оптовая цена, руб.
ДСОР32-0,32-72	60	72	25/4	0,32/0,38	2,7/3,0	0,17	1,96
ДСОР32-0,4-60	50; 60	60	25/4; 15/2	0,4/0,48	2,7/3,0	0,17	1,96
ДСОР32-12-2,4	60	2,4	375/2	2/14	2,7/3,0	0,17	2,16
ДСОР32-15-2	50; 60	2	375/2; 225	15/15	2,7/3,0	0,17	2,16
ДСОР32-25-0,2	50; 60	0,2	1875; 2250	25/25	2,7/3,0	0,18	2,46
ДСОР32-30-1/300	50; 60	1/300	112 500; 135 000	30/30	2,7/3,0	0,19	2,46

разработан и начал серийно выпускаться. Вторым московским часовым заводом понижающий редуктор, имеющий значительно меньшие габариты, не превосходящие габариты двигателя типа ДСО32Р. В недалеком будущем все двигатели типа ДСОР будут выпускаться только с такими редукторами.

Тихоходные многополюсные конденсаторные синхронные микродвигатели типов ДСК, ДСКР

На протяжении многих десятилетий промышленностью в больших количествах выпускалась серия однофазных тихоходных синхронных микродвигателей гистерезисно-реактивного (неревверсивных) типа ДСД и реверсивных ДСДР (см. рис. 25.28, табл. 25.44), представляющих собой сочетание быстроходного (3000 об/мин) гистерезисно-реактивного двигателя со встроенным редуктором, обеспечивающим на выходе частоту вращения 2 или 60 об/мин. Техничко-экономические показатели этой серии не в полной мере удовлетворяют современным требованиям.

В последние годы разработаны новые однофазные реверсивные тихоходные конденсаторные двигатели серий ДСК и ДСКР вместо устаревших двигателей ДСД, ДСДР (табл. 25.44), которые постепенно снимаются с производства.

Статор базового конденсаторного двигателя ДСК32-0,25-0,375 [здесь числа после названия двигателя (ДСК) обозначают: первое (32) — наружный диаметр двигателя, мм, второе (0,25) — пусковой и номинальный момент, Н·см; третье (0,375) — частоту вращения, тыс. об/мин] состоит из двух одинаковых модулей I и II (рис. 25.23), представляющих собой две независимые одинаковые по конструкции фазные системы, каждая из которых состоит из внешнего 6 и внутреннего 9 одинаковых по конструкции штампованных магнитопроводов, имеющих чашеобразную форму, и сосредоточенной обмотки 8, выполненной в виде кольцевой каркасной катушки 7, размещенной между внешним 6 и внутренним 9 магнитопроводами. Кольцевой каркас катушки выполнен из литейного сополимера типа дифлена. Внешние и внутренние магнитопроводы каждого модуля выполнены штамповкой из стали марки П-ВГ-08 КП (ГОСТ 9045-80).

Полюсная система внешних и внутренних магнитопроводов состоит из 16 клювообразных полюсов 10 чередующейся полярности, равно-

мерно расположенных по окружности. Формирование полюсов 10 обеспечивается путем просечек при штамповке листовой заготовки и последующей отгибки полюсов 10 под углом в 90° к торцевым частям внешних и внутренних магнитопроводов.

Передний и задний подшипниковые щиты 5 двигателя имеют форму дисков с отверстиями в центральной части, в которых из литейного сополимера типа СФД или полиамида формируются подшипники скольжения 2, один из которых упирается в пружину 3. Подшипниковые щиты 5 и внешние магнитопроводы 6 механически скрепляются между собой точечной сваркой. Также точечной сваркой скрепляются между собой внутренние магнитопроводы 9 модулей, предварительно сдвинутые между собой на электрический угол 90°.

Ротор двигателя состоит из кольцевого ферритобариевого постоянного магнита 4 марки ФБИ-1а, который опрессован полиамидом 11 на валу 1. Магнит 4 ротора намагничен в радиальном направлении и имеет 16 неявно выраженных полюсов чередующейся полярности.

Частота вращения ротора базового двигателя равна 375 или 450 об/мин при частотах питающего напряжения соответственно 50 или 60 Гц.

Базовый электродвигатель имеет различные исполнения по напряжению: 12, 24, 110, 127, 220 В, которые отличаются друг от друга лишь числом витков обмоток статора.

Функционально-стоимостным анализом доказана технико-экономическая эффективность использования двигателя с номинальным напряжением 110 В путем включения его в сеть последовательно с гасящими напряжением элементами (резисторами или конденсаторами) при питании от однофазной сети с напряжением 220 В и выше.

Наряду с возможностью работы от двухфазной симметричной сети (со сдвигом напряжений фаз во времени на четверть периода) базовый двигатель ДСК32-0,25-0,375 предназначен для работы от однофазной сети с постоянно включенным последовательно с одной из фаз (обмоток) двигателя конденсатором. При этом для номинальных напряжений сети 12, 24 и 40 В используется схема с непосредственным параллельным включением обмоток в сеть, а для напряжений сети 110 В и выше — последовательно с параллельно соединенными обмотками для уменьшения напряжения на них включаются резистор или конденсатор. Реверс

Т а б л и ц а 25.44. Основные технические данные тихоходных синхронных микродвигателей типов ДСДР, ДСК32, ДСКР32

Параметры	ДСДР-60	ДСДР-2	ДСК32- 0,25-0,375	ДСКР32- 0,4-60	ДСКР32- 15-2	ДСКР32- 20-0,2	ДСКР32- 30-1/300
$P_{\text{ном}}$, В·А	30	30	2	2	2	2	2
$n_{\text{ном}}$ ротора, об/мин	3000	3000	375	375	375	375	375
Передаточное число редуктора	50	1500	—	6,25	187,5	1875	112 500
$n_{\text{ном}}$ выходного вала, об/мин	60	2	375	60	2	0,2	1/300
$M_{\text{ц}}$, Н·см	0,2	5	0,4	0,6	25	40	60
$M_{\text{ном}}$, Н·см	0,2	5	0,25	0,4	15	25	30
M_{max} (синхронный), Н·см	—	—	0,5	0,8	30	50	60
Средняя наработка до отказа, ч	3000	3000	20 000	12 000			
Срок службы, годы	1,5	1,5	6	6	6	6	6
Вероятность безотказной работы, годы	0,5 при 2000 ч		0,96 при 8000 ч				
Габаритные размеры	78×62×68		∅32×22	∅32×22+∅50×18			
Удельное использование условного объема, см³/(Н·см)	1300	52	71,2	132,5	3,54	2,65	1,77
Удельная энергоёмкость за базовый срок службы 12 000 ч, кВт·ч/(Н·см)	600	240	94	58,5	1,56	1,17	0,78
Масса, кг	0,65	0,65	0,07	0,15	0,155	0,16	0,17
Удельная материалоемкость, кг/(Н·см)	3,25	0,13	0,28	0,375	0,0103	0,0068	0,00565
Оптовая цена, руб.	2,9	4,5	—	2,2	2,5	2,8	2,9

двигателя достигается посредством переключения конденсатора из цепи одной обмотки в цепь другой.

На базе двигателя типа ДСК32-0,25-0,375, имеющего два исполнения (рис. 25.24, а), разработан отрезок серии однофазных реверсивных конденсаторных тихоходных синхронных двигателей с механическими редукторами типа ДСКР32 (рис. 25.24, б). Основные технические данные этого отрезка серии приведены в табл. 25.44, где для сравнения представлены также данные подлежащих постепенному снятию с

производства двигателей ДСДР-60 и ДСДР-2 реактивно-гистерезисного типа.

Конструктивное исполнение двигателей ДСК32 и ДСКР32 закрытое, с одним выходным концом вала, с выводными концами обмоток из монтажного провода. Рабочее положение в пространстве произвольное. Режим работы продолжительный (S1) по ГОСТ 183.74 или повторно-кратковременный с частыми пусками с продолжительностью включения ПВ = 60 % и частотой включений до 120 и 60 в час соответственно для двигателей ДСК32 и

Рис. 25.26. Механические характеристики гистерезисного двигателя

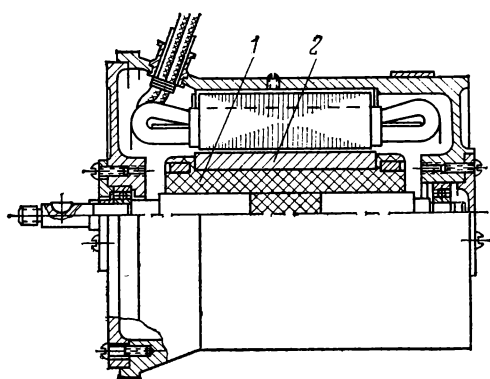


Рис. 25.27. Гистерезисный двигатель серии Г

Положительными качествами синхронных гистерезисных двигателей, которые способствовали их быстрому распространению в технике, являются: большой пусковой момент и момент входа в синхронизм; плавность входа в синхронизм — отсутствие рывка; незначительное изменение тока (20—30 %) при изменении нагрузки от короткого замыкания (пуск) до холостого хода; сравнительно высокий КПД (до 60 %); свойство полисинхронизма ротора — способность одного и того же ротора работать во вращающихся полях различной полюсности; надежная и бесшумная работа; простота конструкции.

К недостаткам гистерезисного двигателя следует отнести прежде всего низкий коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,3 \div 0,46$. Причиной этого в асинхронном режиме является малая магнитная проницаемость материала ротора, а в синхронном режиме, — кроме того, малая намагниченность ротора.

Энергетические показатели гистерезисного двигателя (η , $\cos \varphi$, $P_{\text{ном}}$) могут быть значительно повышены путем подмагничивания ротора в синхронном режиме посредством кратковременного (на два-три периода) повышения магнитного потока статора, например путем увеличения подводящего к статору напряжения. Подмагниченный ротор берет на себя большую долю в создании основного рабочего магнитного потока двигателя ($\Phi \cong U_1 \cdot 10^8 / 4,44 f_1 \omega_1 k_{w1}$), разгружая тем самым обмотку статора от реактивного намагничивающего тока.

Существенным недостатком синхронных гистерезисных двигателей является качание их

роторов при резких изменениях нагрузки — неравномерность хода.

В СССР выпускается несколько серий гистерезисных двигателей как на промышленную частоту (50 Гц), так и на повышенные частоты (400, 500 Гц). Двигатели выпускаются как в трехфазном, так и в однофазном исполнениях. Основные технические данные некоторых серий гистерезисных двигателей представлены в табл. 25.45, 25.46.

Синхронные реактивные двигатели

Статор двигателя обычный. В его пазах располагается трехфазная или двухфазная обмотка. Конструкции роторов реактивного двигателя весьма разнообразны, однако наибольшее распространение получил ротор, конструктивно весьма близкий к ротору асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой, выполненной в виде беличьей клетки (см. рис. 25.16, б, в). Его отличие от ротора асинхронного двигателя состоит лишь в наличии между полюсных впадин-вырезов, с помощью которых образуются явно выраженные полюсы, необходимые для работы двигателя в синхронном режиме.

При пуске в ход двигатель работает как асинхронный. По достижении ротором частоты вращения, близкой к синхронной, он вследствие разности магнитных проводимостей по продольной (совпадающей с осью полюсов) и поперечной (перпендикулярной оси полюсов в системе электрических углов) осям втягивается в синхронизм, занимая такое положение относительно вращающегося магнитного поля, при котором сопротивление потоку минимально.

Синхронизирующий момент, который в значительной мере определяет момент входа двигателя в синхронизм, а также вращающий момент в синхронном режиме зависит от ряда факторов: напряжения питания U_1 , разности магнитных проводимостей по продольной Λ_d и поперечной Λ_q осям, угла смещения оси полюсов относительно оси вращающегося магнитного поля (θ):

$$M = \frac{m_1 U_1}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta,$$

где m — число фаз; ω_1 — угловая скорость ротора; x_d — индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по продольной оси; x_q — индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по поперечной оси; w — эффективное число витков фазы обмотки статора.

Таблица 25.45. Основные технические данные гистерезисных двигателей серии Г

Тип двигателя	Число фаз	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$f, \text{Гц}$	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	$I_{\text{п}}, \text{А}$	$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	$P_{\text{х}}, \text{Вт}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	Конденсатор		Масса, кг	Размеры корпуса, мм		Оптовая цена, руб.
										$C, \text{мкФ}$	$U_C, \text{В}$		L	D	
Г31	1	220	50	0,2	0,25	30	26	3000	4	$2 \pm 5 \%$	300	0,9	81	65	
Г32	3	40	500	2,5	3,2	50	30	7500	16	—	—	0,7	68	65	
Г33	3	220	50	0,2	0,25	33	26	3000	7	—	—	0,9	81	65	
Г34	1	127	50	0,35	0,45	30	26	3000	4	$6 \pm 5 \%$	180	0,9	81	65	
Г-201	1	115	400	0,3	0,45	27	25	8000	2	$0,25 \pm 5 \%$	170	0,3	52,5	58	
Г-210	3	40	500	1	1,3	25	20	7500	3,5	—	—	0,3	52,5	58	
Г-405	1	220	50	0,25	0,3	32	23	3000	9	$3 \pm 10 \%$	260	1,8	113,5	93	
Г-506	3	220	50	1,2	1,4	135	65	3000	60	—	—	4,0	140,5	110	

Таблица 25.46. Основные технические данные гистерезисных электродвигателей нагревостойкой серии ГТ. Номинальная частота 400 Гц

Тип двигателя	Габарит	Длина	$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	m	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	Размеры корпуса		Масса, кг
									L	D	
ГТ 101	1	—	0,6	12 000	36	1	0,22	7,0	62	30	0,15
ГТ 103	1	—	1,2	12 000	36	3	0,23	7,4			
ГТ 105	1	—	0,6	8 000	36	1	0,23	6,5			
ГТ 211	2	—	3	12 000	115	1	0,18	15	79	58	0,35
ГТ 219	2	—	2,0	8 000	115	1	0,15	14			
ГТ 220	2	—	1,2	6 000	200	3	0,08	13			
ГТ 221	2	—	6	12 000	200	3	0,14	18,5	96	77	0,7
ГТ 352	3	1	6	12 000	115	1	0,35	28			
ГТ 354	3	1	15	12 000	200	3	0,45	35			
ГТ 355	3	1	4	8 000	115	1	0,5	25	111	77	1,0
ГТ 356	3	1	6	6 000	200	3	0,35	24			
ГТ 308	3	2	6	8 000	115	1	0,32	27			
ГТ 310	3	2	25	12 000	200	3	0,7	50	123,5	93	1,7
ГТ 311	3	2	8	12 000	115	1	0,7	30			
ГТ 312	3	2	10	6 000	200	3	0,36	30			
ГТ 452	4	1	40	12 000	200	3	0,65	65	138,5	93	1,9
ГТ 453	4	1	25	6 000	200	3	0,6	50			
ГТ 408	4	2	40	6 000	200	3	0,6	75			
ГТ 410	4	2	60	12 000	200	3	1,10	100	152	110	3,0
ГТ 552	5	1	60	6 000	200	3	1,15	90			
ГТ 553	5	1	80	12 000	200	3	1,30	120			
ГТ 505	5	2	120	12 000	200	3	2,0	180	172	110	3,7
ГТ 508	5	2	80	6 000	200	3	1,7	130			

Примечания: 1. Двигатели серии ГТ предназначены для работы в условиях значительных ускорений, тряски и вибрации.

2. Однофазные двигатели ГТ работают с постоянно включенным конденсатором, обеспечивающим запуск и вхождение в синхронизм при номинальном моменте сопротивления на валу.

Разница магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям машины, сильно влияющая на пусковые и рабочие свойства двигателя, определяется конфигурацией ротора, у большинства двигателей полюсная дуга $b_p = 0,5 \div 0,6$ полюсного деления τ , а максимальный воздушный зазор (в середине впадины) в 10—12 раз больше зазора под полюсами.

В последнее время разницу магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям машины стали достигать также за счет внутренних вырезов в пакете стали ротора.

Синхронный реактивный микродвигатель весьма прост в изготовлении. Он может быть получен из обычного асинхронного микродвигателя путем выфрезерования междуполюсных впадин на роторе с короткозамкнутой обмоткой типа беличьей клетки. Этот двигатель надежен в работе и имеет невысокую стоимость.

Недостатками синхронного реактивного двигателя, которые способствуют его вытеснению другими двигателями, являются низкий КПД (в двигателях мощностью в несколько десятков ватт он не превышает 35—40 %, а в двигателях, мощностью от долей ватт до не-

скольких ватт составляет всего несколько процентов), низкий $\cos \phi$ (не более 0,5), большие габариты и масса при сравнительно небольшой мощности на валу.

Синхронные реактивные двигатели выпускаются как в трехфазном, так и в однофазном исполнении (конденсаторными и с экранированными полюсами).

В СССР нет единой серии синхронных реактивных двигателей, однако они выпускаются для специальных приводов в довольно больших количествах. В табл. 25.47 приведены основные технические данные некоторых из них.

Однофазные синхронные двигатели типов ДСД, ДСДР

Однофазные синхронные двигатели ДСД, ДСДР являются двигателями реактивно-гистерезисного типа. Они изготавливаются в открытом бескорпусном исполнении (рис. 25.28). Вращающееся магнитное поле здесь создается за счет экранирования частей полюсов короткозамкнутыми витками. Ротор двигателя состоит из 6—7 имеющих форму колец с перемычками пластин толщиной 0,4 мм, выполненных из закаленной магнитотвердой стали и

Таблица 25.47. Основные технические данные синхронных реактивных микродвигателей типов СОЛ-1, СД-10, $f=50$ Гц

Тип двигателя	Число фаз m	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	$n, \text{об/мин}$	$\eta, \%$	$\cos \phi$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	Масса, кг	$C_p, \text{мкФ}$	Оптовая цена, руб.
СОЛ-1	3	220	1,2	65	1500	45	0,3	—	6,4	—	71
СД-10	2	127	0,38	10	3000	28	0,77	2	1,9	3	12
		220	0,22							1	

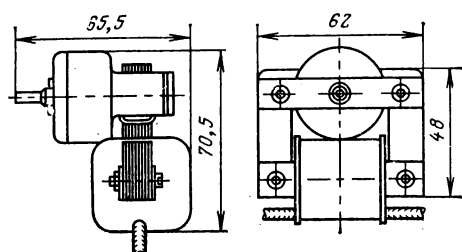


Рис. 25.28. Синхронный реактивно-гистерезисный микродвигатель типа ДСД

насаженных на вал посредством прорезей в перемычках. Вал с роторными пластинами через шестеренки связан с редуктором, понижающим частоту вращения. Ротор с редуктором заключен в общий герметически закрытый корпус из листовой латуни.

Механическая мощность двигателей ДСД и ДСДР очень невелика. Она не превосходит 14 мВт.

Двигатель ДСДР в отличие от ДСД реверсивный. У него короткозамкнутые витки заменены катушками. Катушки расположены не на одной, а на обеих частях каждого из полюсов, охватывая половину полюса. Всего катушек 4. Замыкая то одну, то другую пару катушек, можно изменять направление вращения ротора.

В табл. 25.44 представлены основные технические данные двигателей ДСДР.

25.16. ТИХОХОДНЫЕ СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ РЕДУКЦИЕЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

У этих двигателей статор и ротор набираются из листов электротехнической стали. Ротор имеет вполне определенное для каждого типа двигателя число открытых пазов Z_R . Статор может иметь либо открытые пазы (Z_S), либо полузакрытые и даже закрытые пазы ($Z_S=0$).

В пазах статора в зависимости от типа двигателя могут располагаться одна или две обмотки. Одна из обмоток, называемая главной, имеет p пар полюсов. Она может быть либо трехфазной, либо двухфазной. Главная обмотка питается от сети переменного тока с частотой f и создает вращающееся поле двигателя.

Вспомогательная обмотка имеет число пар полюсов p' , не равное p . Она может быть трехфазной, двухфазной или однофазной. Ее питание может осуществляться как от сети переменного тока с частотой f' , так и от сети постоянного тока ($f'=0$). В последнем случае она может быть заменена постоянными магнитами.

Магнитное поле в воздушном зазоре двигателя вследствие открытых пазов ротора (а в некоторых машинах и статора) сильно деформируется — в нем появляется целый ряд высших гармоник, обусловленных как зубчатостью ротора, так и зубчатостью статора,

Высшие гармоники поля (v) вращаются в пространстве медленнее, чем основное поле: $n_{cv} = n_c/v = 60f/pv$.

От взаимодействия высших гармоник статора и ротора (одного порядка) между собой возникает вращающий момент, под действием которого ротор двигателя вращается в пространстве.

Частота вращения ротора n зависит от чисел пар полюсов основной и дополнительной обмоток (p и p'), чисел зубцов статора и ротора (Z_S , Z_R), а также от частот напряжений, питающих основную и дополнительную обмотки (f и f'). В общем случае она может быть выражена следующим образом:

$$n = \frac{60(f \pm f')}{Z_R} = \frac{60(f \pm f')}{Z_S \pm (p' \pm p)}.$$

В двигателях с закрытыми пазами статора следует принимать $Z_S=0$.

Синхронные двигатели с электромагнитной редукцией по их конструкции и принципу действия можно разделить на четыре нижеследующие группы.

1. Двигатели с радиальным возбуждением, которые могут выполняться либо с возбуждением постоянным током, либо с самовозбуждением, либо с постоянными магнитами (рис. 25.29). В любом случае число пар полюсов однофазной вспомогательной обмотки (обмотки возбуждения) или постоянных магнитов равно p' . Частота вращения ротора двигателя (с учетом того, что $f'=0$) может быть определена по нижеследующему выражению:

$$n = \frac{60f}{Z_R} = \frac{60f}{Z_S \pm (p' + p)}.$$

В случае самовозбуждения вспомогательная обмотка замыкается накоротко через выпрямляющие ток диоды. ЭДС в обмотке наводится за счет ее трансформаторной связи с главной обмоткой.

2. Двигатели двойного питания получают в случае, когда вспомогательная обмотка питается от постоянного источника переменного тока с частотой f' . Частота вращения ротора в этом случае соответствует основному выражению n (см. выше).

3. Двигатели с униполярным возбуждением имеют либо обмотку возбуждения постоянного тока, либо постоянные магниты, которые создают униполярное поле в воздушном зазоре (рис. 25.30). Частота вращения ротора в этом

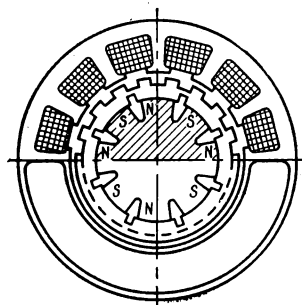


Рис. 25.29. Синхронный двигатель с электромагнитной редукцией с радиальным возбуждением постоянными магнитами

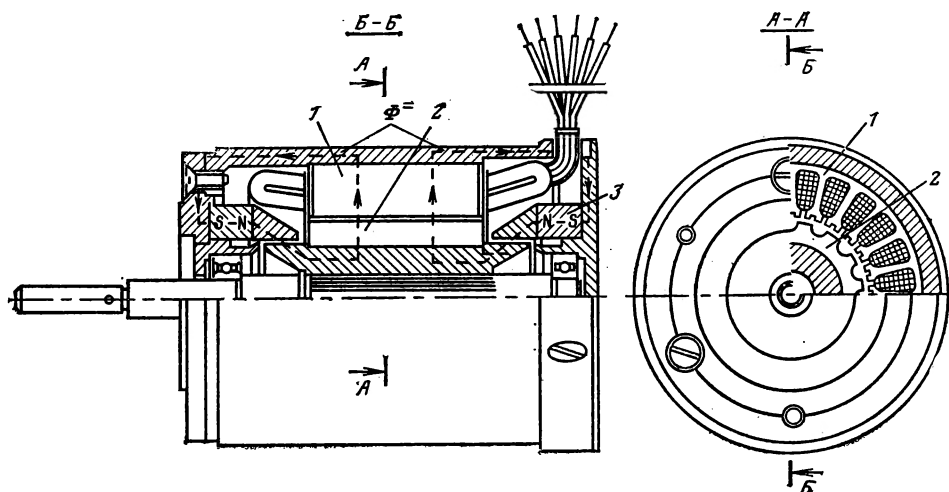


Рис. 25.30. Синхронный двигатель с электромагнитной редукцией с униполярным возбуждением постоянными магнитами:

1 — статор; 2 — ротор; 3 — постоянный магнит

Таблица 25.48. Основные технические данные синхронных тихоходных двигателей с электромагнитной редукцией при частоте $f=50$ Гц, $U_{\text{НОМ}}=220$ В (кроме КРД, у которого $U_{\text{НОМ}}=115$ В)

Тип двигателя	Число фаз сети	$P_{\text{НОМ}}$, Вт	$M_{\text{НОМ}}$, Н·м	n , об/мин	$I_{\text{НОМ}}$, А	P_1 , Вт	M_{max} , Н·м	$M_{\text{П}}$, Н·м	η , %	$\cos \varphi$	Масса, кг	Размеры, мм		Оптовая цена, руб.
												D	L	
ДСР-2	1	0,02	0,1	2	0,08	16,8	0,2	0,2	12	0,96	0,7	57	71	119
	3	0,03	0,16			15,8	0,25	0,25	21	0,9				
ДСР-60	1	0,06	0,01	60	0,08	16,8	0,02	0,02	25	0,96	0,7	57	71	103
	3	0,092	0,015			15,8	0,03	0,03	58	0,9				
КРД-71,5	1	5,3	0,72	71,5	0,7	60	1,08	0,72	8,9	0,75	5,5	96	138	—
ОРД-60	1	0,061	0,01	60	0,07	10	0,014	0,0065	6	0,65	0,45	60	37	—
ОРД-1	1	0,615	0,6	1	0,1	15	0,72	0,6	41	0,65	0,6	60	66	—
ДСР3-10-115	1	7,1	0,6	115	0,53	65	0,69	0,6	10,9	0,56	5	100	140	58
	3	11,8					1,3	1	18,2					

Примечание. Двигатели типа ОРД однофазные с экранированными полюсами. Остальные двигатели работают в однофазном режиме как конденсаторные.

случае может быть определена как

$$n = \frac{60f}{Z_R} = \frac{60f}{Z_S \pm p}.$$

4. Реактивные двигатели имеют на статоре только одну, главную обмотку, питаемую от сети переменного тока. Эти двигатели можно рассматривать как синхронные двигатели с электромагнитной редукцией, у которых дополнительная обмотка имеет такое же число пар полюсов, что и главная, при этом она совмещена с главной, т. е. $p'=p$ и $f=f'$. Частота вращения ротора реактивного двигателя

$$n = \frac{120f}{Z_R} = \frac{120}{Z_S \pm 2p}.$$

Недостатком тихоходных синхронных двигателей с электромагнитной редукцией является

отсутствие у них пускового момента. Однако этот недостаток при малых номинальных частотах вращения не ощущается, так как вследствие вибрации ротор самостоятельно приходит во вращение, а при больших частотах вращения устраняется с помощью специальных пусковых устройств.

К положительным свойствам двигателей с электромагнитной редукцией следует отнести то, что мощность, потребляемая ими при пуске и при работе, практически одинакова, что позволяет использовать эти двигатели для работы «на упор» — при неподвижном роторе.

В случае необходимости получения низких частот вращения (единицы — десятки об/мин) двигатели снабжаются механическими редукторами.

В табл. 25.48 предоставлены основные технические данные некоторых двигателей с электромагнитной редукцией.

В. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА И КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

25.17. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЕРИЯХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА, ВЫПУСКАЕМЫХ В СССР

В табл. 25.49 содержится обзор основных серий машин постоянного тока, выпускаемых в СССР. Ежегодный выпуск машин постоянного тока в СССР значительно меньше выпуска машин переменного тока. Основными сериями

машин общепромышленного применения в настоящее время являются единые серии 2П и П2, которые охватывают машины всего необходимого народному хозяйству диапазона мощностей и частот вращения. Помимо этих серий выпускаются серии генераторов и двигателей постоянного тока, главным образом специализированного назначения: тяговые, краново-металлургические, судовые и др.

Т а б л и ц а 25.49. Серии машин постоянного тока, выпускаемые в СССР

Тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$U_{\text{ном}}$, В	Краткая характеристика
<i>Двигатели</i>				
2П	0,37—200	600—3000	110, 220, 340, 440	Выпускаются в различных исполнениях по способу защиты и охлаждения; общего назначения; заменяют двигатели серии П 1—11-го габаритов
П2	315—10 000	25—500	440, 750, 930	Закрывают с принудительной вентиляцией; независимое возбуждение; заменяют двигатели серии П 18—22-го габаритов
П(1—11-го габаритов)	0,2—200	600—3000	110, 220, 440	Общепромышленного применения и специализированного назначения
П(12—22-го габаритов)	100—6300	100—1500	220—1000	
Д	2,5—185 при ПВ=100 %	410—1460	220, 440	Высокая кратность пусковых моментов, широкий диапазон регулирования частоты вращения; для привода металлургических, крановых и др. механизмов
ПБВ	0,75—5,5	1000	60—110	Закрывают; возбуждение от постоянных магнитов; высокомоментные; для работы в автоматической системе станков с ЧПУ
ПГ, ПГТ ПС, ПСТ ПБС, ПБСТ	1,0—9,0 0,12—0,75 0,4—11,3	3000 3000 3000	60—220 110, 220 110, 220 340, 440	Закрывают с естественным охлаждением (ПГ, ПГТ), защищенные с принудительной вентиляцией (ПС, ПСТ, ПБС, ПБСТ); реверсивные, исполнительные, общего назначения
ДПМ	2,8—60 при ПВ=25 %	675—1700	110, 220	Водозащищенные, с естественным охлаждением; широкий диапазон регулирования частоты вращения; для привода судовых механизмов
МП	1000—6300	32/80—63/80	440, 930	Закрывают с принудительной вентиляцией; для привода прокатных станов
МПС	45, 630, 11 500	50/100, 63/80, 750/1000	220, 600, 930	Специальные электродвигатели для металлургической промышленности
2МП	2000—12 600	50/100—300/500	930	Закрывают с принудительной вентиляцией; двухъякорные; для привода прокатных станов
МИ	0,1—0,37	1000, 2000, 3000	60, 110	Закрывают (водозащищенные); для работы в схемах автоматики
МПБ	21—600 в режиме двигателя 25—800 в режиме генератора	1250—3100 1500—3200	220—580 230—700	Балансирные машины; для работы в качестве тормозного генератора или двигателя при испытании электрических машин и других механизмов
<i>Генераторы</i>				
П(1—11-го габаритов)	1,1—1,90	970—2850	115, 230, 460, 110/160, 220/320	Защищенные; смешанное возбуждение; со стабильным и регулируемым напряжением; общего назначения; для зарядки аккумуляторов
П(18—22-го габаритов)	1000—6300	375, 500, 750	630—1000	Закрывают с принудительной вентиляцией; для автономного питания двигателей по схеме Г—Д
ГП2	5700, 4200	375	725, 950	Для работы в двух- и трехмашинных преобразовательных агрегатах
ГП	630—9500	375—1250	440—930	Для питания двигателей главных приводов прокатных станов

25.18. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЕДИНОЙ СЕРИИ 2П МОЩНОСТЬЮ ДО 200 кВт

Двигатели постоянного тока серии 2П предназначены для общепромышленного применения в системах современного регулируемого электропривода. Серия 2П охватывает двигатели в диапазоне мощностей 0,37—200 кВт при высотах оси вращения 90—315 мм.

Серия 2П разработана электротехнической промышленностью вместо устаревшей серии электродвигателей постоянного тока П1—11-го габаритов, по сравнению с которой имеет следующие преимущества:

- мощность в заданном габарите значительно увеличена;
- расширен диапазон регулирования частоты вращения;

- улучшены динамические показатели;
- снижен уровень вибраций и шума;
- обеспечена устойчивая коммутация, включая работу от тиристорных преобразователей;
- срок службы практически удвоен;
- двигатели имеют унифицированные установочные и присоединительные размеры, соответствующие рекомендациям МЭК.

Для замены двигателей серии П 12—26-го габаритов разработана единая серия двигателей постоянного тока П2 с высотой оси вращения 355 мм и выше.

Двигатели серии 2П классифицируются по следующим признакам:

- 1) степень защиты от окружающей среды (табл. 25.50);

- 2) способ охлаждения (табл. 25.50);

- 3) частота вращения (двигатели с высотой оси вращения 90—200 мм изготавливаются с частотой вращения 750, 1000, 1500, 2200, 3000 об/мин, а с высотой оси вращения 225—315 мм — 600, 750, 1000, 1500 об/мин);

- 4) номинальное напряжение обмотки якоря (110, 220, 340, 440 В);

- 5) напряжение независимого возбуждения (110, 220 В).

Структурное обозначение типа двигателя серии 2П: 2 — порядковый номер серии; П —

Таблица 25.50. Степень защиты двигателей серии 2П в зависимости от высоты оси вращения и способа охлаждения

Высота оси вращения, мм	Способ охлаждения машины	Способ защиты от окружающей среды	Степень защиты	Обозначение исполнения
90—315	С самовентилирующей	Защищенные	IP22	Н
132—315	С независимой вентилирующей от постороннего вентиллятора	То же	IP22	Ф
90—200	С естественным охлаждением	Закрытые	IP44	Б
132—200	С наружным обдувом от постороннего вентиллятора	»	IP44	О

двигатель постоянного тока; третья буква — исполнение по способу защиты и охлаждения (табл. 25.50); двух- или трехзначное число — высота оси вращения в мм; следующая за числом буква — условная длина сердечника якоря (М — первая длина, L — вторая длина); Г — наличие буквы означает, что двигатель выполнен с тахогенератором; последние буква и цифра означают климатическое исполнение и категорию размещения. Пример: 2ПФ160LV4 — двигатель постоянного тока защищенного исполнения с независимой вентилирующей от постороннего вентиллятора, с высотой оси вращения 160 мм, второй длины, без тахогенератора, климатического исполнения У, категории размещения 4.

Все двигатели серии 2П выполняются с независимым возбуждением и имеют компенсационную обмотку, обеспечивающую высокие перегрузки и широкий диапазон регулирования частоты вращения. Изоляция двигателей выполнена на основе полиамидных пленок и полиамидной бумаги, имеющей высокую электрическую прочность (160 МВ/м).

На рис. 25.31 показана принципиальная конструкция двигателя серии 2П (исполнение с тахогенератором).

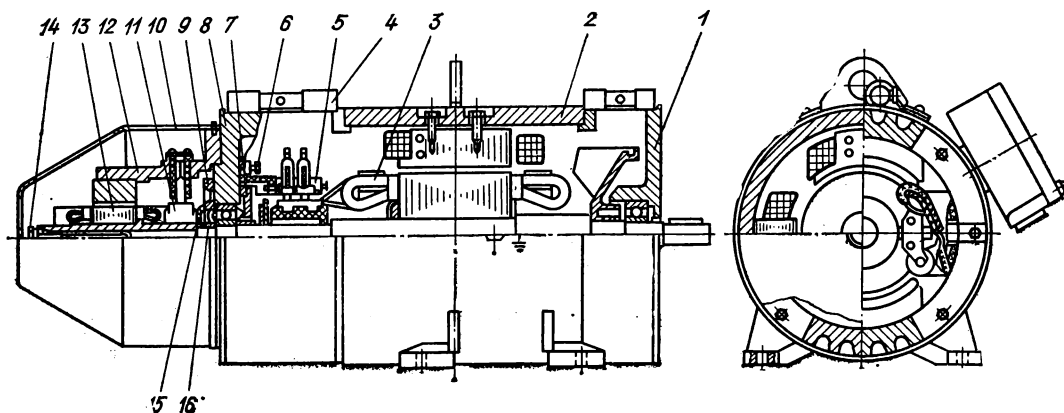


Рис. 25.31. Электродвигатель постоянного тока серии 2П с тахогенератором:

1 — задний подшипниковый щит; 2 — станина; 3 — якорь; 4 — защитная лента; 5 — траверса; 6 — болт; 7 — лабиринт; 8 — передний подшипниковый щит; 9 — кольцо; 10 — колпак; 11 — коллектор тахогенератора; 12 — станина тахогенератора; 13 — якорь тахогенератора; 14 — болт; 15 — крышка; 16 — лабиринт

Таблица 25.51. Технические данные двигателей серии 2П с высотой оси вращения 90—200 мм

Тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	n_{max} , об/мин				$P_{\text{ном}}$, кВт	n_{max} , об/мин				$P_{\text{ном}}$, кВт	n_{max} , об/мин				Оптовая цена за один двигатель, руб.
		110 В	220 В	340 В	440 В		110 В	220 В	340 В	440 В		110 В	220 В	340 В	440 В	
$n_{\text{ном}} = 750$ об/мин																
2ПБ90М	0,13	3000	1500	900	—	0,18	4000	2000	1200	—	0,28	4000	3000	1800	—	—
2ПБ90Л	0,18	3000	1500	900	—	0,25	4000	2000	1200	—	0,37	4000	3000	1800	—	—
2ПБ100М	0,26	3000	1500	900	—	0,37	4000	2000	1200	—	0,6	4000	3000	1800	—	—
2ПБ112М	0,34	3000	2500	2000	1500	0,45	4000	3500	2500	2000	0,75	4000	4000	3500	3000	—
2ПБ112Л	0,5	3000	2500	2000	1500	0,63	4000	3500	2500	2000	1,0	4000	4000	3500	3000	—
2ПБ132М	1,1	3000	2500	2000	1500	1,6	4000	3500	2500	2000	2,4	4000	4000	3500	3000	—
2ПБ132Л	1,6	3000	2500	2000	1500	1,9	4000	3000	2500	2000	3,2	4000	4000	3500	3000	—
2ПБ160М	2,1	3000	2500	2000	1500	2,5	4000	3000	2500	2000	4,2	4000	4000	3500	3000	—
2ПБ160Л	2,5	3000	2500	2000	1500	3,2	4000	3000	2500	2000	5,3	4000	4000	3500	3000	—
2ПБ180М	3,4	3000	2500	2000	1500	4,5	3500	3000	2500	2000	7,1	3500	3500	3500	3000	—
2ПБ180Л	4,2	3000	2500	2000	1500	5,6	3500	3000	2500	2000	8,5	3500	3500	3500	3000	—
2ПБ200Л	6,0	3000	2500	2000	1500	8,0	—	3000	2500	2000	11,0	—	3500	3500	3000	—
$n_{\text{ном}} = 1000$ об/мин																
2ПО132М	1,3	3000	2500	2000	1500	1,8	4000	3000	2500	2000	2,8	4000	4000	3500	3000	—
2ПО132Л	1,6	3000	2500	2000	1500	2,2	4000	3000	2500	2000	3,4	4000	4000	3500	3000	—
2ПО160М	2,5	3000	2500	2000	1500	3,2	4000	3000	2500	2000	6,0	4000	4000	3500	3000	—
2ПО160Л	3,2	3000	2500	2000	1500	4,0	4000	3000	2500	2000	7,1	4000	4000	3500	3000	—
2ПО180М	4,5	3000	2500	2000	1500	6,3	3500	3000	2500	2000	10,0	3500	3500	3500	3000	—
2ПО180Л	5,2	3000	2500	2000	1500	7,5	3500	3000	2500	2000	—	—	—	—	—	—
2ПО200М	6,0	3000	2500	2000	1500	9,0	—	3000	2500	2000	14,0	—	3500	3500	3000	—
2ПО200Л	7,1	3000	2500	2000	1500	11,0	—	3000	2500	2000	17,0	—	3500	3500	3000	—
$n_{\text{ном}} = 1500$ об/мин																
2ПН90М	0,17	3000	1500	900	—	0,25	4000	2000	1200	—	0,37	4000	3000	1800	—	160
2ПН90Л	0,22	3000	1500	900	—	0,34	4000	2000	1200	—	0,55	4000	3000	1800	—	166
2ПН100М	0,37	3000	1500	900	—	0,5	4000	2000	1200	—	0,75	4000	3000	1800	—	178
2ПН100Л	0,42	3000	1500	900	—	—	—	—	—	—	1,1	4000	3000	1800	—	182
2ПН112М	0,6	3000	2500	2000	1500	0,85	4000	3500	2500	2000	1,5	4000	4000	3500	3000	234
2ПН112Л	0,8	3000	2500	2000	1500	1,25	4000	3500	2500	2000	2,2	4000	4000	3500	3000	247
2ПН132М	1,6	3000	2500	2000	1500	2,5	4000	3500	2500	2000	4,0	4000	4000	3500	3000	348
2ПН132Л	1,9	3000	2500	2000	1500	3,0	4000	3000	2500	2000	5,5	4000	4000	3500	3000	386
2ПН160М	3,0	3000	2500	2000	1500	4,5	4000	3000	2500	2000	7,5	4000	4000	3500	3000	440
2ПН160Л	4,0	3000	2500	2000	1500	6,3	4000	3000	2500	2000	11,0	4000	4000	3500	3000	494
2ПН180М	5,6	3000	2500	2000	1500	8,0	3500	3000	2500	2000	15,0	3500	3500	3500	3000	583
2ПН180Л	7,1	3000	2500	2000	1500	10,0	3500	3000	2500	2000	18,5	—	3500	3500	3000	628
2ПН200М	8,5	3000	2500	2000	1500	13,0	3500	3000	2500	2000	22,0	—	3500	3500	3000	778
2ПН200Л	11,0	3000	2500	2000	1500	16,0	—	3000	2500	2000	30,0	—	3500	3500	3000	825
$n_{\text{ном}} = 2200$ об/мин																
2ПФ132М	2,0	3000	2500	2000	1500	3,0	4000	3000	2500	2000	4,0	4000	4000	3500	3000	—
2ПФ132Л	2,8	3000	2500	2000	1500	4,2	4000	3000	2500	2000	5,5	4000	4000	3500	3000	—
2ПФ160М	4,2	3000	2500	2000	1500	6,0	4000	3000	2500	2000	7,5	4000	4000	3500	3000	—
2ПФ160Л	5,6	3000	2500	2000	1500	8,0	4000	3000	2500	2000	11,0	4000	4000	3500	3000	—
2ПФ180М	9,0	3000	2500	2000	1500	12,0	3500	3000	2500	2000	15,0	3500	3500	3500	3000	—
2ПФ180Л	10,0	3000	2500	2000	1500	14,0	3500	3000	2500	2000	18,5	—	3500	3500	3000	—
2ПФ200М	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22,0	—	3500	3500	3000	—
2ПФ200Л	15,0	3000	2500	2000	1500	20,0	—	3000	2500	2000	30,0	—	3500	3500	3000	—

Продолжение табл. 25.51

Тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	n_{max} , об/мин				$P_{\text{ном}}$, кВт	n_{max} , об/мин				J , кг·м ²	Масса, кг	b_{11} , кг	l_{30} , м	Оптовая цена за один двигатель, руб.
		110 В	220 В	340 В	440 В		110 В	220 В	340 В	440 В					
$n_{\text{ном}} = 2200$ об/мин															
2ПБ90М	0,4	4000	4000	2700	—	0,55	4000	4000	3600	—	0,004	24	0,179	0,369	—
2ПБ90Л	0,53	4000	4000	2700	—	0,75	4000	4000	3600	—	0,005	27	0,179	0,394	—
2ПБ100М	0,85	4000	4000	2700	—	1,2	4000	4000	3600	—	0,011	36	0,211	0,414	—
2ПБ112М	1,1	4000	4000	3500	3500	1,4	4000	4000	4000	4000	0,014	47	0,220	0,486	—
2ПБ112Л	1,5	4000	4000	3500	3500	2,0	4000	4000	5000	4000	0,017	56	0,220	0,531	—
2ПБ132М	3,7	4000	4000	4000	4000	4,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	86	0,256	0,618	—
2ПБ132Л	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0468	96	0,256	0,662	—
2ПБ160М	6,0	4000	4000	3500	3000	7,1	4000	4000	4000	4000	0,0835	141	0,312	0,642	—
2ПБ160Л	7,5	4000	4000	3500	3000	8,1	—	4000	4000	4000	0,104	159	0,312	0,692	—
2ПБ180М	9,5	3500	3500	3500	3000	12,0	—	3500	3500	3500	0,20	213	0,340	0,780	—
2ПБ180Л	11,0	—	3500	3500	3500	—	—	—	—	—	0,229	234	0,340	0,819	—
2ПБ200Л	15,0	—	3500	3500	3500	—	—	—	—	—	0,30	325	0,392	0,842	—
$n_{\text{ном}} = 3000$ об/мин															
2ПО132М	4,5	4000	4000	4000	4000	5,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	100	0,256	0,881	—
2ПО132Л	5,3	4000	4000	4000	4000	6,7	4000	4000	4000	4000	0,0468	110	0,256	0,925	—
2ПО160М	8,00	4000	4000	4000	4000	9,5	4000	4000	4000	4000	0,0835	151	0,312	0,915	—
2ПО160Л	10,0	4000	4000	4000	4000	12,0	—	4000	4000	4000	0,104	169	0,312	0,965	—
2ПО180М	14,0	—	3500	3500	3500	17,0	—	3500	3500	3500	0,20	235	0,340	1,047	—
2ПО180Л	16,0	—	3500	3500	3500	—	—	—	—	—	0,229	256	0,340	1,087	—
2ПО200М	20,0	—	3500	3500	3500	20,0	—	3500	3500	3500	0,25	312	0,392	1,057	—
2ПО200Л	24,0	—	3500	3500	3500	28,0	—	—	3500	3500	0,30	355	0,392	1,117	—

Продолжение табл. 25.51

Тип	$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	$n_{\text{тах}}, \text{ об/мин}$				$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	$n_{\text{тах}}, \text{ об/мин}$				$J, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	Масса, кг	$b_{11}, \text{ кг}$	$l_{30}, \text{ м}$	Оптовая цена за один двигатель, руб.
		110 В	220 В	340 В	440 В		110 В	220 В	340 В	440 В					
2ПН90М	0,71	4000	4000	2700	—	1,0	4000	4000	3600	—	0,004	24	0,179	0,369	160
2ПН90Л	0,9	4000	4000	2700	—	1,3	4000	4000	3600	—	0,005	27	0,179	0,394	166
2ПН100М	1,2	4000	4000	2700	—	—	—	—	—	—	0,011	36	0,211	0,414	178
2ПН100Л	—	—	—	—	—	2,2	4000	4000	3600	—	0,012	39	0,211	0,434	182
2ПН112М	2,5	4000	4000	3500	3500	3,6	4000	4000	4000	4000	0,014	47	0,220	0,486	234
2ПН112Л	3,4	4000	4000	3500	3500	5,3	4000	4000	4000	4000	0,017	56	0,220	0,531	247
2ПН132М	7,0	4000	4000	4000	4000	10,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	86	0,256	0,618	348
2ПН132Л	8,5	4000	4000	4000	4000	14,0	4000	4000	4000	4000	0,468	96	0,256	0,663	386
2ПН160М	13,0	—	4000	4000	4000	18,0	—	4000	4000	4000	0,0835	141	0,312	0,642	440
2ПН160Л	16,0	—	4000	4000	4000	24,0	—	4000	4000	4000	0,104	159	0,312	0,694	494
2ПН180М	26,0	—	3500	3500	3500	37,0	—	3500	3500	3500	0,20	213	0,340	0,779	583
2ПН180Л	30,0	—	3500	3500	3500	42,0	—	3500	3500	3500	0,229	234	0,340	0,819	628
2ПН200М	36,0	—	3500	3500	3500	60,0	—	3500	3500	3500	0,25	282	0,392	0,782	778
2ПН200Л	53,0	—	—	3500	3500	75,0	—	—	3500	3500	0,30	325	0,392	0,842	825
2ПФ132М	6,0	4000	4000	4000	4000	7,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	98	0,256	0,917	—
2ПФ132Л	7,5	4000	4000	4000	4000	11,0	4000	4000	4000	4000	0,0468	108	0,256	0,962	—
2ПФ160М	13,5	—	4000	4000	4000	16,0	—	4000	4000	4000	0,0835	153	0,312	0,952	—
2ПФ160Л	16,0	—	4000	4000	4000	18,5	—	4000	4000	4000	0,104	171	0,312	1,002	—
2ПФ180М	—	—	—	—	—	26,0	—	3500	3500	3500	0,2	236	0,340	1,079	—
2ПФ180Л	25,0	—	3500	3500	3500	32,0	—	3500	3500	3500	0,229	257	0,340	1,119	—
2ПФ200М	30,0	—	3500	3500	3500	40,0	—	3500	3500	3500	0,25	303	0,392	1,103	—
2ПФ200Л	42,0	—	3500	3500	3500	55,0	—	—	3500	3500	0,30	346	0,392	1,163	—

Примечание. Оптовая цена двигателей 2ПБ, 2ПО и 2ПФ определяется путем прибавления к оптовой цене двигателя 2ПН соответствующего типа-размера надбавки, составляющей для двигателей

2ПБ 10 %, для двигателей 2ПО 18 %, для двигателей 2ПФ 8 % стоимости двигателя 2ПН, при этом в стоимость двигателя 2ПФ не входит стоимость приводного электродвигателя.

Таблица 25.52. Мощность двигателей серии 2П с высотой оси вращения 225—315 мм в зависимости от частоты вращения и исполнения ($U=220 \text{ В}$)

Высота оси вращения, мм	Условная длина	$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$, при частоте вращения, об/мин							
		1500		1000		750		600	
		Н	Ф	Н	Ф	Н	Ф	Н	Ф
225	М	37	—	22	—	15	18,5	11	15
225	Л	45	—	30	—	18,5	22	15	18,5
250	М	55	—	37	—	22	30	18,5	22
250	Л	75	—	45	—	30	37	22	28
280	М	110	—	75	—	45	45	30	37
280	Л	132	—	90	—	55	55	37	45
315	М	160	—	110	—	75	75	45	55
315	Л	200	—	132	—	85	90	55	75

Технические требования, предъявляемые к двигателям серии 2П, сформулированы в ГОСТ 20529-82.

В табл. 25.51 приведены технические данные двигателей серии 2П с высотой оси вращения 90—200 мм. В табл. 25.52 дана зависимость мощности двигателей серии 2П с высотой оси вращения 225—315 мм напряжением 220 В от частоты вращения и исполнения по способу охлаждения.

25.19. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ И КРАНОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА СЕРИИ Д

Электродвигатели серии Д предназначены для работы в электроприводах металлургических, крановых, экскаваторных и других механизмов в условиях повышенной влажности, запыленности и вибраций. Электродвигатели серии Д удовлетворяют рекомендациям Международной электротехнической комиссии и по

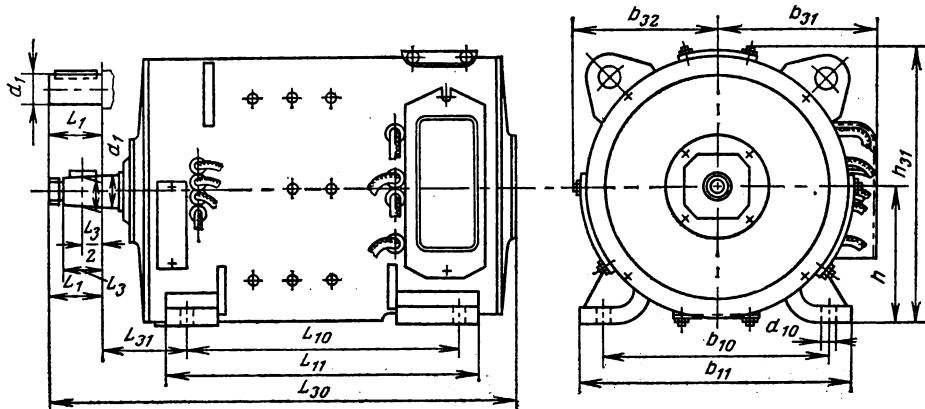


Рис. 25.32. Электродвигатель постоянного тока серии Д (габаритные и установочные размеры)

Таблица 25.53. Номинальная мощность и частота вращения металлургических и крановых электродвигателей постоянного тока серии Д на напряжение 220 В

Тип электро- двигателя	Закрытые в часовом режиме и продуваемые в длительном режиме (ПВ = 100 %)					Закрытые в повторно-кратковременном режиме (ПВ = 40 %)										Максимально допустимая частота вращения, об/мин	Оптовая цена за один дви- гатель, руб.
	Мощность $P_{\text{ном}}$, кВт	Частота вращения n , об/мин, при возбуж- дении				Мощность P , кВт, и частота вращения n , об/мин, при возбуждении											
		последова- тельным	смешанном	параллельном со стабилизи- рующей об- моткой	параллельном	последова- тельным		смешан- ном		параллельном со стабили- зирующей обмоткой		парал- лельном					
						P	n	P	n	P	n	P	n				
Д-12	2,5	1100	1175	1140	1180	2,4	1150	2,4	1230	2,4	1200	2,4	1230	3600	335		
Д-21	4,5	900	1050	1000	1030	3,6	1040	3,6	1140	3,6	1060	3,6	1080	3600	495		
Д-22	6,0	850	1050	1070	1100	4,8	970	4,8	1120	4,8	1120	4,8	1150	3600	525		
Д-31	8,0	800	870	820	840	6,8	900	6,8	910	6,8	850	6,8	880	3600	605		
Д-32	12,0	675	780	740	770	9,5	760	9,5	840	9,5	770	9,5	800	3300	700		
Д-41	16,0	650	700	670	690	13,0	730	13,0	740	13,0	700	13,0	720	3000	940		
Д-806	22,0	575	650	635	650	19,0	640	17,0	730	16,0	700	16,0	710	2600	1035		
Д-808	37,0	525	575	565	575	24,0	615	24,0	650	22,0	620	22,0	630	2300	1420		
Д-310	55,0	500	—	540	550	35,0	610	—	—	29,0	590	29,0	600	2200	1470		
Д-812	75,0	475	—	500	515	47,0	560	—	—	38,0	555	38,0	565	1900	1970		
Д-814	110,0	460	—	490	500	66,0	565	—	—	55,0	550	55,0	560	1700	2790		
Д-816	150,0	450	—	470	480	85,0	540	—	—	70,0	525	70,0	535	1600	3340		
Д-818	185,0	410	—	440	450	100,0	515	—	—	83,0	460	83,0	470	1500	4740		

Тихоходные															
Д-12	2,5	1100	1175	1140	1180	2,4	1150	2,4	1230	2,4	1200	2,4	1230	3600	335
Д-21	4,5	900	1050	1000	1030	3,6	1040	3,6	1140	3,6	1060	3,6	1080	3600	495
Д-22	6,0	850	1050	1070	1100	4,8	970	4,8	1120	4,8	1120	4,8	1150	3600	525
Д-31	8,0	800	870	820	840	6,8	900	6,8	910	6,8	850	6,8	880	3600	605
Д-32	12,0	675	780	740	770	9,5	760	9,5	840	9,5	770	9,5	800	3300	700
Д-41	16,0	650	700	670	690	13,0	730	13,0	740	13,0	700	13,0	720	3000	940
Д-806	22,0	575	650	635	650	19,0	640	17,0	730	16,0	700	16,0	710	2600	1035
Д-808	37,0	525	575	565	575	24,0	615	24,0	650	22,0	620	22,0	630	2300	1420
Д-310	55,0	500	—	540	550	35,0	610	—	—	29,0	590	29,0	600	2200	1470
Д-812	75,0	475	—	500	515	47,0	560	—	—	38,0	555	38,0	565	1900	1970
Д-814	110,0	460	—	490	500	66,0	565	—	—	55,0	550	55,0	560	1700	2790
Д-816	150,0	450	—	470	480	85,0	540	—	—	70,0	525	70,0	535	1600	3340
Д-818	185,0	410	—	440	450	100,0	515	—	—	83,0	460	83,0	470	1500	4740

Тихоходные

Быстроходные

Д-21	5,5	1200	1450	1400	1440	4,4	1340	4,4	1550	4,4	1460	4,4	1500	3600	—
Д-22	8,0	1200	1390	1450	1510	6,5	1300	6,5	1475	6,5	1510	6,5	1570	3600	—
Д-31	12,0	1100	1280	1310	1360	9,5	1190	9,5	1360	9,5	1360	9,5	1420	3600	—
Д-32	18,0	960	1100	1140	1190	13,5	1100	13,0	1200	13,0	1190	13,0	1240	3300	—
Д-41	24,0	970	1120	1060	1100	18,0	1060	18,0	1160	17,5	1120	17,5	1160	3000	—
Д-806	32,0	900	980	980	1000	23,0	1010	23,0	1060	21,0	1050	21,0	1060	2600	—
Д-808	47,0	720	800	770	800	30,0	850	30,0	860	26,0	810	26,0	825	2300	—

Примечание. Данные часового и продолжительного режимов считаются номинальными.

своим техническим показателям соответствуют лучшим зарубежным сериям.

По степени защиты двигатели выпускаются в двух исполнениях: закрытые IP21 и с принудительной вентиляцией IP20 (см. § 23.7). Класс изоляции Н — провода ПСДКТ, пропитка термоактивным компаундом — «Монолит-2». Технические данные двигателей на напряжение 220 В в продолжительном (ПВ = 100 %), в часовом и в повторно-кратковременном (ПВ = 40 %) режимах приведены в

табл. 25.53. Примерно такими же данными обладают двигатели на напряжение 440 В.

Двигатели допускают регулирование частоты вращения в широком диапазоне. Максимальная частота вращения примерно в 3 раза превышает номинальную. Двигатели обладают высокими динамическими показателями (малые момент инерции и механические постоянные времени). Габаритные и установочные размеры двигателей, показанные на рис. 25.32, приведены в табл. 25.54.

Таблица 25.54. Основные размеры и масса электродвигателей постоянного тока серии Д

Тип	b_{10}	b_{11}	b_{21}	b_{32}	d_1	d_2	d_{10}	l_1	l_2	l_{10}	l_{11}	l_{20}	l_{21}	h	h_{21}	Масса, кг	J , кг·м ²
Д-12	280	330	185	160	28	—	19	60	—	220	280	561	115,0	160	323	130	0,2
Д-21	300	350	215	185	35	—	19	80	—	194	244	665	170,5	180	373	200	0,5
Д-22	300	350	215	185	35	—	19	80	—	239	289	710	170,5	180	373	225	0,62
Д-31	390	460	250	225	50	—	25	110	—	250	310	752	173,0	225	453	310	1,2
Д-32	390	460	250	225	50	—	25	110	—	320	380	822	173,0	225	453	365	1,7
Д-41	430	530	305	255	65	61,5	32	105	70	299	379	910	209,0	250	508	540	3,2
Д-806	420	508	305	255	65	61,5	32	105	70	533	613	930	165,0	250	508	635	4,0
Д-808	476	578	335	285	80	75,5	32	130	90	628	710	1047	159,0	280	562	885	8,0
Д-810	520	623	480	320	90	85,5	32	130	90	660	780	1114	178	315	635	1250	14,5
Д-812	570	690	510	350	100	94	35	165	120	724	884	1220	172	340	690	1770	28,0
Д-814	636	762	545	385	120	114	42	165	120	813	943	1362	200	375	762	2240	41,0
Д-816	686	826	570	410	130	122,5	42	200	150	890	1050	1502	212	400	810	2850	65,0
Д-818	760	915	620	460	140	132,5	48	200	150	990	1130	1579	201	450	910	3745	110,0

25.20. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И УНИВЕРСАЛЬНЫЕ

Общие сведения о микродвигателях постоянного тока

Микродвигатели постоянного тока в конструктивном отношении отличаются от двигателей средней и большой мощности отсутствием дополнительных полюсов и компенсационных обмоток. Полюсы и станина некоторых типов микродвигателей вследствие их работы в переходных режимах выполняются не массивными, а шихтованными из листов электротехнической стали. Практически все микродвигатели постоянного тока имеют закрывающиеся люки — отверстия в крышках со стороны коллектора для обеспечения возможности протирки коллектора, которая проводится регулярно через определенное число часов работы. Микродвигатели постоянного тока по способу возбуждения можно разделить на двигатели с параллельным, независимым, последовательным возбуждением и двигатели с постоянными магнитами.

Двигатели постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением

Вращающий момент микродвигателей постоянного тока с параллельным возбуждением практически пропорционален току. Механическая характеристика двигателя при отсутствии насыщения имеет вид прямой линии. Частота вращения двигателей n с параллельным (независимым) возбуждением регулируется либо путем изменения напряжения питания U , либо введением в цепь якоря дополнительного резистора R , либо изменением магнитного потока Φ . На рис. 25.33 представлены механические характеристики двигателя при различных способах регулирования частоты вращения.

Кроме обычных двигателей постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением для схем автоматики выпускаются двигатели со стабилизированной частотой вра-

щения. Эти двигатели снабжены специальными центробежными регуляторами; с их помощью в цепь обмотки возбуждения включается или выключается дополнительное сопротивление, посредством которого изменяется ток возбуждения. За счет этого частота вращения двигателя поддерживается постоянной как при изменении в определенных пределах нагрузки, так и при изменении на 5—10 % напряжения питания. Точность стабилизации скорости зависит от качества центробежного регулятора и обычно составляет $\pm 5\%$.

В СССР выпускается несколько серий силовых микродвигателей постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением. Наиболее широкое распространение в настоящее время получили микродвигатели серий ПЛ и СЛ. В табл. 25.55 представлены технические данные двигателей с параллельным возбуждением серии ПЛ.

Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами

Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами не требуют источника питания для возбуждения. Их КПД вследствие отсутствия потерь на возбуждение выше, чем у двигателей с электромагнитным возбуждением. Устройство их проще, чем у обычных двигателей. Масса на единицу мощности — удельная масса ниже, чем у обычных двигателей.

В настоящее время двигатели с постоянными магнитами выпускаются чаще всего на небольшие мощности — от долей ватта до нескольких десятков ватт.

Конструктивное выполнение двигателей в значительной степени определяется свойствами постоянных магнитов, которые используются для возбуждения. На рис. 25.34 схематично представлены магнитные системы двигателей, получившие наибольшее распространение в настоящее время.

По своим рабочим характеристикам двигатели постоянного тока с постоянными магнитами аналогичны двигателям постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением. Двигатели выпускаются как для приводов с

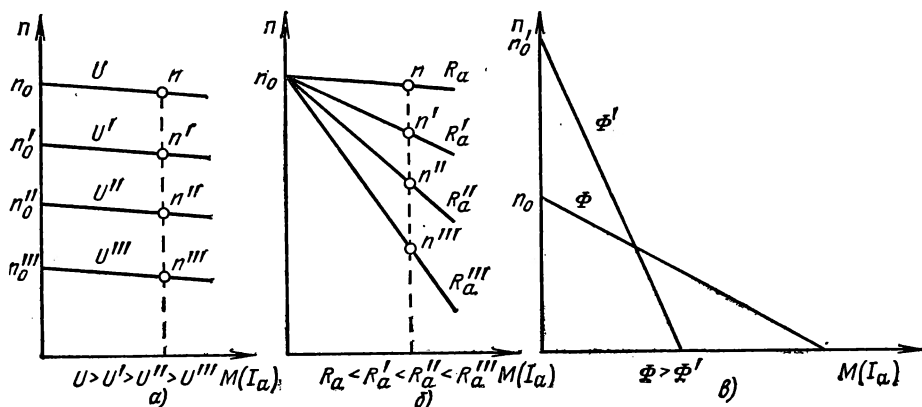


Рис. 25.33. Механические характеристики двигателя постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением при различных способах регулирования частоты вращения: а — при изменении напряжения на обмотке якоря; б — при изменении активного сопротивления в цепи якоря; в — при изменении магнитного потока возбуждения

Таблица 25.55. Основные технические данные электродвигателей постоянного тока с параллельным возбуждением серии ПЛ

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$I_{\text{ном}}, \text{А, при } U_{\text{ном}}, \text{В}$		$\eta, \%$	Масса двигателя, кг, в форме исполнения		Маховой момент $J_{\text{рот}}, 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	Оптовая цена, руб.
			110	220		П2/Ф3	Ф3		
ПЛ 051	30	2700	0,68	0,34	40	2,1	2,0	5	—
ПЛ 052	50	2700	0,96	0,48	47	2,6	2,5	7	—
ПЛ 061	80	2700	1,4	0,7	52	3,7	3,6	13	14,3
ПЛ 062	120	2700	1,9	0,95	57	4,5	4,4	16	15,5
ПЛ 071	180	2700	2,7	1,35	61	5,9	5,7	28	—
ПЛ 072	270	2700	3,8	1,9	65	7,3	7,1	35	—
ПЛ 081	400	2700	5,4	2,7	68	9,3	9,0	65	—
ПЛ 082	600	2700	6,6	3,8	72	12,5	12,2	88	—
ПЛ 061	50	1400	0,9	0,45	50	3,8	3,7	13	—
ПЛ 062	80	1400	1,3	0,65	55	4,5	4,4	16	—
ПЛ 071	120	1400	1,9	0,95	58	6,1	5,9	28	—
ПЛ 072	180	1400	2,6	1,3	64	7,5	7,3	35	32
ПЛ 081	270	1400	3,8	1,9	66	9,5	9,2	65	—
ПЛ 082	400	1400	5,0	2,5	72	12,6	12,3	88	—

регулируемой частотой вращения, так и для приводов, требующих стабилизированной частоты вращения. Регулирование частоты вращения обычно осуществляется с помощью введения в цепь якоря дополнительных резисторов, реже — с помощью изменения напряжения питания.

Стабилизация частоты вращения достигается с помощью центробежных регуляторов,

которые поддерживают частоту вращения постоянной путем периодического замыкания и размыкания цепи якоря.

В табл. 25.56 приведены основные технические данные двигателей постоянного тока с постоянными магнитами серии ДПМ, выпускаемых в СССР. Выпуск двигателей с постоянными магнитами с каждым годом увеличивается, что объясняется уменьшением стоимости и

Таблица 25.56. Основные технические данные микродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами серии ДПМ исполнения НЗ с одним выходным концом вала и встроенным центробежным стабилизатором частоты вращения

Тип двигателя	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$M_{\text{ном}}, \text{мН} \cdot \text{м}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	$M_{\text{п}}, \text{мН} \cdot \text{м}$	Оптовая цена, руб.
ДПМ-20-НЗ-01	27	1	9000	0,2	7	33
ДПМ-20-НЗ-03	27	1	12 000	0,25	8	33
ДПМ-20-НЗ-03	27	1,5	6000	0,18	6	33
ДПМ-20-НЗ-04	27	2	4500	0,15	5	33
ДПМ-20-НЗ-06	12	1	9000	0,45	7	33
ДПМ-20-НЗ-07	12	1	12 000	0,55	8	33
ДПМ-20-НЗ-08	12	1,5	6000	0,45	6	33
ДПМ-20-НЗ-09	12	2	4500	0,4	5	33
ДПМ-20-НЗ-06А	14	1	9000	0,4	7	33
ДПМ-20-НЗ-07А	14	1	12 000	0,5	8	33
ДПМ-20-НЗ-08А	14	1,5	6000	0,4	6	33
ДПМ-20-НЗ-09А	14	2	4500	0,35	5	33
ДПМ-25-НЗ-01	27	3	6000	0,25	18	32
ДПМ-25-НЗ-02	27	2,2	9000	0,3	20	32
ДПМ-25-НЗ-03	12	3	6000	0,6	18	32
ДПМ-25-НЗ-04	27	2	12 000	0,3	20	32
ДПМ-25-НЗ-05	24	4	4500	0,25	15	32
ДПМ-25-НЗ-06	12	2,2	9000	0,65	20	32
ДПМ-25-НЗ-07	12	2	12 000	0,65	20	32
ДПМ-25-НЗ-08	12	4	4500	0,55	15	32
ДПМ-25-НЗ-03А	14	3	6000	0,5	18	32
ДПМ-25-НЗ-06А	14	2,2	9000	0,6	20	32
ДПМ-25-НЗ-07А	14	2	12 000	0,6	20	32
ДПМ-25-НЗ-08А	14	4	4500	0,5	15	32
ДПМ-25-НЗ-16	27	5,6	5200	0,5	18	32
ДПМ-30-НЗ-01	27	7	9000	0,85	40	38
ДПМ-30-НЗ-02	27	5	12 000	0,7	35	38
ДПМ-30-НЗ-03	27	11	6000	0,7	35	38
ДПМ-30-НЗ-04	27	10	4500	0,6	30	38
ДПМ-30-НЗ-06	12	7	9000	1,8	40	38
ДПМ-30-НЗ-07	12	5	12 000	1,9	40	38
ДПМ-30-НЗ-08	12	10	6000	1,5	35	38
ДПМ-30-НЗ-09	12	10	4500	1,3	30	38
ДПМ-30-НЗ-06А	14	17	9000	1,7	40	38
ДПМ-30-НЗ-07А	14	5	12 000	1,8	40	38
ДПМ-30-НЗ-08А	14	10	6000	1,4	35	38
ДПМ-30-НЗ-09А	14	10	4500	1,2	30	38

Примечания: 1. Первые две цифры в обозначении типа — диаметр корпуса в мм; последние — номер исполнения; НЗ — обозначение встроенного стабилизатора.

2. Длины корпусов: ДПМ-20—50 мм; ДПМ-25—59 мм; ДПМ-30—72 мм.

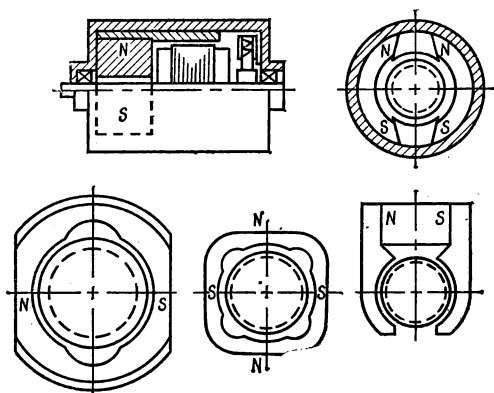


Рис. 25.34. Различные магнитные системы двигателей постоянного тока малой мощности, возбуждаемых постоянными магнитами

улучшением свойств материалов постоянных магнитов.

Двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением

Частота вращения микродвигателей с последовательным возбуждением регулируется чаще всего либо изменением напряжения питания, либо изменением сопротивления, включаемого последовательно с якорем резистора. Первый из этих способов обычно осуществляется с помощью потенциометра. Система «генератор — двигатель» для регулирования микродвигателей не применяется. Второй способ не очень экономичен. Он приводит к значительным потерям мощности в регулировочном резисторе.

Иногда частота вращения двигателя регулируется: вверх от номинальной путем шунтирования небольшим резистором обмотки возбуждения и вниз от номинальной путем шунтирования регулируемым резистором обмотки якоря. Последний способ неэкономичен след-

ствие значительных потерь в шунтирующем резисторе.

Иногда двигатели с последовательным возбуждением выпускаются не с одной, а с двумя обмотками возбуждения. Вторая обмотка служит для реверсирования якоря двигателя — изменения его направления вращения на обратное.

В СССР выпускаются различные типы двигателей с последовательным возбуждением. Основные технические данные некоторых из них представлены в табл. 25.57.

Коллекторные микродвигатели переменного тока

В настоящее время в промышленности, в быту, в схемах автоматики большое распространение получили однофазные коллекторные микродвигатели переменного тока с последовательным возбуждением.

Эти двигатели по своему устройству почти не отличаются от двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением. Их отличием является лишь то, что они имеют не литые, а шихтованные из листовой электро-технической стали станину и полюсы. Последнее необходимо для уменьшения потерь на вихревые токи от переменного во времени магнитного потока.

Вращающий момент двигателя создается, так же как и у двигателей постоянного тока, за счет взаимодействия токов обмотки якоря с магнитным потоком полюсов:

$$M \sim I_a \Phi.$$

При изменении во времени направления тока вращающий момент практически не изменяется по направлению, так как почти одновременно с током $I = I_m \sin \omega t$ якоря меняет направление и магнитный поток полюсов $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \beta)$. Однако вследствие практически синусоидального изменения во времени тока I и потока Φ вращающий момент не остается постоянным, а синусоидально изменяется во времени с частотой, равной удвоенной частоте

Таблица 25.57. Основные технические данные микродвигателей постоянного тока с последовательным возбуждением серии СЛ

Тип двигателя	Номинальные данные					Габариты, мм		Масса, кг
	$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	$P_{\text{НОМ}}, \text{ Вт}$	$n_{\text{НОМ}}, \text{ об/мин}$	$M_{\text{НОМ}}, \text{ мН} \cdot \text{м}$	$I_{\text{НОМ}}, \text{ А}$	L	D	
Нереверсивные								
СЛ-268	110—127	5,5	3000	1,8	0,17/0,26	155	70	1,4
СЛ-328	110/127	9	2000	4,5	0,25/0,43	144	85	2,2
СЛ-528	110/127	30	3000	9,75	0,95/1,4	196	108	3,9
СЛ-565	110	170	3000	55	2,15	173	108	5,3
Реверсивные								
СЛ-123	110	5,5	4500	1,2	0,185	88	50	0,41
СЛ-163	110	10	4000	2,4	0,26	100	50	0,55
СЛ-222	110	10,3	4000	2,5	0,35	104	70	1,2
СЛ-262	110	14,5	4000	3,5	0,45	115	70	1,4
СЛ-322	110	22	3600	6	0,6	123	85	2,2
СЛ-365	110	58	5000	10	0,8	133	85	2,5
СЛ-523	110	77	3000	25	1,0	148	108	3,9
СЛ-563	110	110	4000	28	1,5	173	108	5,3

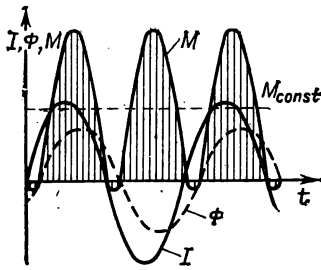


Рис. 25.35. Зависимости вращающего момента M , тока i и магнитного потока обмотки возбуждения Φ от времени в однофазном коллекторном двигателе переменного тока

сети. В отдельные моменты времени (рис. 25.35) он даже становится отрицательным. Изменение момента, однако, вследствие большой частоты его изменения во времени и значительных моментов инерции якоря и приводимого во вращение механизма практически мало ощущимо. Двигатель развивает на валу момент, равный среднему за период значению мгновенного момента.

По своим рабочим свойствам коллекторный двигатель переменного тока напоминает двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением, но несколько уступает последнему по своим энергетическим показателям (η , $\cos \phi$) вследствие повышенных электрических и магнитных потерь.

Положительными свойствами коллекторных двигателей переменного тока, способствующими их широкому распространению, несмотря на их недостатки, являются: во-первых, возможность получения при промышлен-

ной частоте 50 Гц практически любых частот вращения, во-вторых, возможность простого плавного и широкого регулирования частоты вращения. Эти двигатели особенно широко применяются там, где при промышленной частоте 50 Гц требуется получить высокие частоты вращения: 3000—20 000 об/мин, чего невозможно добиться с помощью синхронных и асинхронных двигателей.

Частота вращения коллекторных двигателей переменного тока с последовательным возбуждением регулируется точно так же, как и у аналогичных двигателей постоянного тока.

Серьезным недостатком коллекторных двигателей переменного тока является плохая их коммутация — повышенное искрение под щетками, что объясняется наведением в коммутируемых секциях ЭДС трансформации.

Вследствие значительного искрения контакт коллектор — щетка является источником радиопомех, для подавления которых обычно применяются специальные фильтры. Однако даже с помощью фильтров полностью освободиться от радиопомех не удается.

В СССР выпускается большое количество коллекторных двигателей переменного тока для самых различных целей, особенно для быта (пылесосы, миксеры и т. п.). В табл. 25.58, 25.59 представлены основные технические данные двигателей общепромышленного применения, получивших наиболее широкое применение.

Универсальные коллекторные двигатели

В настоящее время кроме коллекторных двигателей постоянного и переменного тока выпускается большое количество универсаль-

Таблица 25.58. Основные технические данные универсальных коллекторных электродвигателей в защищенном исполнении типа УЛ

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, Вт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$I_{\text{ном}}$, А, при $U_{\text{ном}}$, В				η , %	$\cos \phi$	Масса, кг, при форме исполнения		Момент инерции, 10^{-3} кг·м ²	Оптовая цена, руб.
			110 =	127 ~	220 =	220 ~			Ш2/Ф3	Ф3		
УЛ-02	10	8000	0,27	0,26	0,14	0,15	34	0,9	0,44	0,42	0,2	—
УЛ-03	18	8000	0,41	0,39	0,2	0,23	40	0,9	0,66	0,63	0,5	—
УЛ-041	30	8000	0,54	0,55	0,27	0,32	50	0,85	1,15	1,1	1,5	9,0
УЛ-042	50	8000	0,82	0,84	0,41	0,49	55	0,85	1,4	1,35	2,0	9,5
УЛ-051	80	8000	1,25	1,28	0,63	0,74	58	0,85	2,1	2,0	5,0	—
УЛ-052	120	8000	1,82	1,85	0,9	1,1	60	0,85	2,6	2,5	7,0	—
УЛ-061	180	8000	2,64	2,68	1,3	1,6	62	0,85	3,7	3,5	13	13,2
УЛ-062	270	8000	3,84	3,7	1,9	2,1	64	0,9	4,4	4,2	16	13,7
УЛ-071	400	8000	5,7	5,45	2,85	3,15	64	0,9	5,8	5,6	28	—
УЛ-072	600	8000	8,55	8,15	4,3	4,7	64	0,9	7	6,8	35	—
УЛ-02	5	5000	0,2	0,21	0,1	0,12	22	0,86	0,44	0,42	0,2	—
УЛ-03	10	5000	0,31	0,32	0,15	0,19	30	0,82	0,66	0,63	0,5	—
УЛ-041	18	5000	0,45	0,49	0,23	0,28	36	0,8	1,15	1,1	1,5	—
УЛ-051	50	5000	0,93	1,07	0,46	0,62	49	0,75	2,1	2,0	5,0	—
УЛ-052	80	5000	1,3	1,5	0,64	0,86	56	0,75	2,6	2,5	7,0	—
УЛ-061	120	5000	1,92	2,46	0,9	1,3	57	0,75	3,8	3,6	13,0	—
УЛ-062	180	5000	2,82	3,26	1,4	1,9	58	0,75	4,5	4,3	16,0	—
УЛ-071	270	5000	3,96	4,3	2,0	2,5	62	0,8	5,9	5,7	28	—
УЛ-072	400	5000	5,5	5,95	2,8	3,4	66	0,8	7,1	6,9	35	—
УЛ-041	5	2700	0,15	0,2	0,08	0,11	25	0,7	1,15	1,1	1,5	—
УЛ-042	10	2700	0,23	0,27	0,11	0,16	36	0,7	1,4	1,35	2,0	—
УЛ-051	18	2700	0,33	0,5	0,16	0,29	40	0,7	2,1	2,0	5,0	—
УЛ-052	30	2700	0,47	0,75	0,23	0,43	45	0,7	2,6	2,5	7,0	—
УЛ-061	50	2700	0,81	1,18	0,4	0,67	48	0,7	3,9	3,7	13	—
УЛ-062	80	2700	1,25	1,88	0,63	1,1	48	0,7	4,6	4,4	16	—
УЛ-071	120	2700	1,82	2,58	0,91	1,5	52	0,7	6,1	5,9	28	—
УЛ-072	180	2700	2,48	3,6	1,2	2,1	56	0,7	7,4	7,2	35	—
УЛ-081	270	2700	3,5	5	1,7	2,9	60	0,7	9,5	9,2	65	—
УЛ-082	400	2700	5,0	6,9	2,5	4,0	65	0,7	12,6	12,3	88	—

Примечание. Двигатели серии УЛ выпускаются либо на лапах и фланцевым креплением — исполнение Ш2/Ф3, либо только с фланцевым креплением — исполнение Ф3.

Таблица 25.59. Основные технические данные универсальных коллекторных электродвигателей серии УМТ

Тип двигателя	$n_{\text{ном'}}$ об/мин	$P_{\text{ном'}}$ Вт	При питании постоянным током			При питании переменным током					Масса, кг
			$U_{\text{ном'}}$ В	$I_{\text{ном'}}$ А	η , %	$U_{\text{ном'}}$ В	$I_{\text{ном'}}$ А	η , %	$\cos \varphi$	Частота F , Гц	
УМТ-11	3000	5	110	0,25	22—26	127	0,35	22—26	0,55—0,58	50	1,5
УМТ-12	2000	10	110	0,35	30—33	127	0,5	30—33	0,47—0,53	50	2,0
УМТ-12С											
УМТ-21	1800	25	110	0,55	44—46	127	0,85	39—41	0,65—0,67	50	3,5
УМТ-21Р	1800	40	220	0,45	40	—	—	—	—	—	3,5
УМТ-22	2500	55	110	1,0	54—56	127	1,5	49—51	0,71—0,73	50	4,5
УМТ-22СТ2	2500	55	220	0,6	55—57	220	0,8	47—49	0,76—0,78	50	4,5
УМТ-21-1	1800	25	110	0,55	—	127	0,85	—	0,63—0,65	60	3,5
УМТ-22-1	2500	55	110	1,0	54—56	127	1,5	—	0,69—0,71	60	4,5

Примечания: 1. Двигатели УМТ-12С, УМТ-22СТ2 выпускаются без лап.
2. У двигателей УМТ-11 и УМТ-21Р выводится один конец вала, у остальных — два.
3. Двигатель УМТ-21Р — реверсивный.

ных коллекторных двигателей, способных работать как от сетей постоянного, так и от сетей переменного тока промышленной частоты.

По своему устройству эти двигатели почти не отличаются от коллекторных двигателей переменного тока с последовательным возбуждением. Их отличительной особенностью является наличие дополнительного среднего вывода у обмотки возбуждения (рис. 25.36, а). При работе на постоянном токе под напряжение включается вся обмотка возбуждения, при работе на переменном токе — лишь часть обмотки возбуждения. Последнее необходимо для сближения характеристик двигателя на постоянном и переменном токах (рис. 25.36, б).

Дело в том, что при использовании всей обмотки на переменном токе двигатель развивает меньшие моменты и имеет меньшие частоты вращения, чем на постоянном токе, что объясняется влиянием на величину и фазу переменного тока индуктивных сопротивлений обмоток якоря и возбуждения.

Следует отметить, что даже при использовании на переменном токе лишь части витков обмотки возбуждения двигатель может быть универсальным лишь по величине развиваемой мощности, причем только при какой-то одной вполне определенной частоте вращения. При всех других частотах вращения механические характеристики двигателя на переменном токе хуже, чем на постоянном. На переменном токе ниже КПД вследствие увеличенных электрических и магнитных потерь, хуже коммутация из-за наличия ЭДС трансформации.

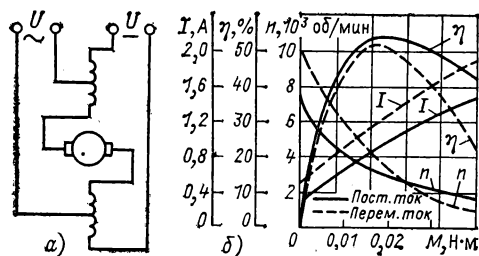


Рис. 25.36. Принципиальная электрическая схема (а) и рабочие характеристики (б) универсального коллекторного двигателя типа УМТ-22

Обычно у универсальных двигателей номинальная мощность на постоянном токе несколько выше, чем на переменном.

В СССР выпускается несколько серий универсальных коллекторных двигателей УЛ, УМТ, МУН и др. Основные технические данные некоторых универсальных коллекторных двигателей представлены в табл. 25.58, 25.59.

25.21. БЕСКОНТАКТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Двигатели постоянного тока обычного исполнения с механическим коммутатором — коллектором и щетками — имеют ряд существенных недостатков, обусловленных наличием щеточно-коллекторного узла. Эти недостатки ограничивают области их применения.

В последнее время начали находить все более широкое применение бесконтактные (вентильные) двигатели постоянного тока, имеющие не механический (коллектор — щетки), а полупроводниковый коммутатор. Эти двигатели, обладающие практически почти всеми положительными качествами обычных двигателей постоянного тока, лишены их основного недостатка — не имеют щеточно-коллекторного узла.

В отличие от обычных двигателей постоянного тока бесконтактные двигатели выполняются обращенными (рис. 25.37, б, в). Они имеют вращающийся индуктор (ротор), создающий основное поле машины, и неподвижный якорь с обмоткой, состоящей из отдельных секций (как и в обычной машине постоянного тока, только с уменьшенным их числом), концы которых подводятся к электронному коммутатору. В этом случае необходимо для работы машины коммутацию (переключение секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую) необходимо производить не у вращающейся обмотки (как в обычной машине), а у неподвижной, расположенной в пазах статора (рис. 25.37, в). Операция переключения секций обмотки осуществляется электронным коммутатором, который придает бесконтактной машине и производит коммутацию по сигналу датчика положения ротора.

В бесконтактных двигателях постоянного тока малой мощности основное поле машины

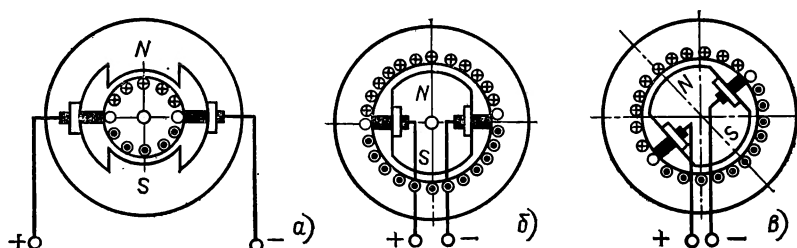


Рис. 25.37. Упрощенные модели двигателей постоянного тока:

а — обычного; б, в — обращенного

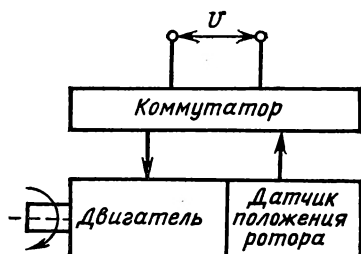


Рис. 25.38. Структурная схема бесконтактного двигателя постоянного тока

обычно создается явнополюсным или неявнополюсным постоянным магнитом, располагающимся на вращающейся части машины — роторе.

Бесконтактные двигатели постоянного тока малой мощности, как правило, состоят из трех элементов:

1) бесконтактного двигателя с m -фазной обмоткой на статоре и возбужденным ротором (обычно в виде постоянного магнита);

2) датчика положения ротора (выполненного в одном корпусе с двигателем), вырабатывающего сигналы управления, определяющие моменты, время и последовательность коммутации обмоток двигателя;

3) бесконтактного коммутатора, осуществляющего по сигналам датчика положения коммутацию токов в обмотках статора двигателя.

На рис. 25.38 представлена структурная схема бесконтактного двигателя постоянного тока.

Отсутствие щеточно-коллекторного узла и связанной с ним искровой коммутации значительно повышает надежность работы бесконтактного двигателя, позволяет выполнять двигатели на высокие частоты вращения, до-

стигающие десятков тысяч оборотов в минуту.

В табл. 25.60 приведены основные технические данные высокоскоростных бесконтактных двигателей постоянного тока, выпускаемых в СССР [25.12].

В табл. 25.61 приведены основные технические данные бесконтактных двигателей постоянного тока для кассетных магнитофонов, которые являются первыми бесконтактными двигателями бытового назначения, разработанными в СССР. На рис. 25.39 представлен поперечный разрез одного из таких двигателей.

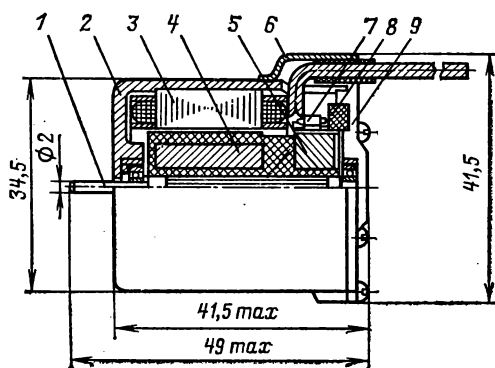


Рис. 25.39. Бесконтактный микродвигатель типа БДС-0,2 для кассетных магнитофонов:

1 — вал; 2 — корпус; 3 — пакет стали статора; 4 — магнит возбуждения ротора двигателя; 5 — магнит возбуждения датчика положения ротора; 6 — крышка; 7 — один из трех трансформаторов датчика положения ротора; 8 — пластмассовая обойма, на которой укреплены трансформаторы датчика положения ротора; 9 — подшипниковый щит со стороны датчика положения ротора

Таблица 25.60. Основные технические данные высокоскоростных бесконтактных двигателей постоянного тока широкого назначения (ротор сборный с постоянными магнитами)

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, Вт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	η , %	Размеры активной части ротора, мм		Мощность на единицу объема активной части, 10^{-6} , Вт/м ³	Объем активной части двигателя, 10^{-6} м ³
				Δ	D		
БД-400/60	400	60 000	81	25	16	9	45
БД-500/150	500	150 000	67*/76	25	19	11	45
БД-1200/30	1200	30 000	82	30	38	4,5	264
БД-3000/70	3000	70 000	78	30	38	11	264

* В числителе — с шариковыми подшипниками, в знаменателе — с газовыми опорами.

Таблица 25.61. Основные технические данные бесконтактных двигателей постоянного тока для кассетных магнитофонов

Параметр	БДС-0,2	БДС-02М	БДС-0,14	ДБМ-02-2000
Напряжение питания (номинальное), В	9	9	9	9
Диапазон изменения напряжения, В	5,1—9,3	5,1—9,3	6—10	6—10
Момент (номинальный), 10 ⁻⁴ Н·м	6	6	6	8
Частота вращения, об/мин (верхняя/нижняя)	3000/1500	3000/1500	2000/—	2000/
Точность стабилизации, %:				
верхняя	±1,3	±1,0	±1,5	±1,5
нижняя	±2,0	±2,0		
КПД, %	25	24	24	20
Уровень шума на расстоянии 0,25 м, дБ (А)	38	33	30	38
Ресурс работы, ч (не менее)	2000	2000	2000	1500
Масса двигателя с коммутатором, кг	0,170	0,170	0,150	—
Габариты двигателя, мм	∅ 34×41	∅ 34×43	∅ 34×33	—
Габариты коммутатора, мм	95×55×10	95×55×16	95×55×16	—

25.22. ТРЕХФАЗНЫЕ КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Трехфазный коллекторный двигатель переменного тока по принципу действия является асинхронной машиной, так как якорь (ротор) машины вращается с частотой, отличной от синхронной частоты вращения поля.

Регулирование частоты вращения осуществляется путем введения во вторичную цепь машины дополнительной ЭДС E_{Δ} частоты скольжения. Для этого на якоре машины размещается обмотка, подобная якорной обмотке машин постоянного тока, присоединяемая к коллектору.

Коллектор и щеточное устройство служат для преобразования тока одной частоты, имеющегося в коллекторной обмотке, в ток другой частоты в цепи, присоединенной к щеткам. При помощи коллектора во вторичную обмотку машины вводится дополнительная ЭДС, имеющая ту же частоту, что и ЭДС, индуцированная во вторичной обмотке вращающимся магнитным полем. При перемещении щеток и изменении режима величина и фаза этой ЭДС изменяются.

Введение во вторичную обмотку дополнительной ЭДС позволяет широко и плавно регулировать частоту вращения двигателя, добываясь одновременно высокого коэффициента мощности.

Коллекторная машина обратима — она может работать и в режиме двигателя, и в режиме генератора. Однако в генераторном режиме коллекторные машины используются крайне редко. Коллекторные асинхронные генераторы, позволяющие получить постоянную частоту при переменной частоте вращения или, наоборот, переменную частоту при постоянной частоте вращения применяются только в специальных схемах [23.2, 24.13].

Коллекторные трехфазные машины находят применение в каскадных соединениях с асинхронными машинами с фазным ротором. Каскадные соединения позволяют регулировать коэффициент мощности и частоту вращения асинхронной машины с фазным ротором. Опи-

сание схем и характеристик каскадных соединений см. в [23.1, ч. 3; 23.2; 24.13; 24.19].

Коллекторные асинхронные двигатели лишены основных недостатков бесколлекторных асинхронных двигателей — они позволяют плавно, экономично и при высоком коэффициенте мощности регулировать частоту вращения. Вместе с тем стоимость коллекторных двигателей в 1,5—2 раза больше стоимости двигателей постоянного тока и в 4—6 раз больше стоимости асинхронных двигателей.

Совершенствование системы регулирования частоты вращения с помощью обычных асинхронных двигателей, создание двигателей постоянного тока с широким диапазоном регулирования частоты вращения привели в последние годы к ограничению применения коллекторных машин переменного тока.

Наибольшее распространение из трехфазных коллекторных двигателей получил коллекторный двигатель с параллельным возбуждением и двойным комплектом щеток (двигатель Шраге — Рихтера).

Устройство и принцип действия двигателя поясняются на рис. 25.40. Первичная обмотка I двигателя расположена на роторе и представляет собой обычную трехфазную обмотку

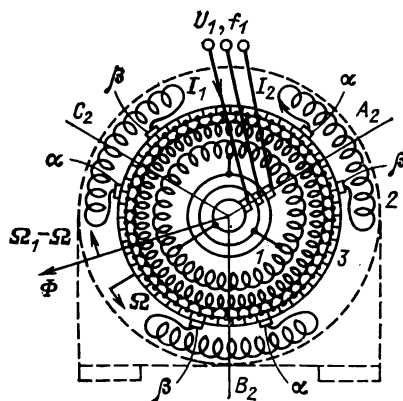


Рис. 25.40. Трехфазный коллекторный двигатель с двойным комплектом щеток

переменного тока, соединенную в звезду или в треугольник. Питание первичной обмотки осуществляется от сети (U_1, f_1) через контактные кольца. В тех же пазах, что и первичная обмотка, размещена дополнительная обмотка 3, которая присоединяется к коллектору и представляет собой обычную обмотку якоря машины постоянного тока. Вторичная обмотка 2 двигателя размещена на статоре. Это — трехфазная или многофазная обмотка, концы которой присоединяются к щеткам α и β , опирающимся на коллектор. Все щетки α и все щетки β укрепляются на двух отдельных траверсах, которые с помощью специальной механической системы можно взаимно перемещать.

Регулирование частоты вращения двигателя осуществляется введением во вторичную обмотку дополнительной ЭДС E_Δ частоты скольжения $f_2 = sf_1$. Эта ЭДС индуцируется вращающимся потоком Φ в части дополнительной обмотки 3, заключенной между щетками α и β , к которым присоединены концы фазы вторичной обмотки. Частота дополнительной ЭДС равна частоте основной ЭДС вторичной обмотки $f_\Delta = sf_1$, где f_1 — частота ЭДС, индуцированной в обмотке 3 вращающимся потоком Φ ; $s = (\Omega_1 - \Omega)/\Omega_1$ — скольжение статора (щеток) по отношению к вращающемуся полю; Ω_1 — угловая скорость магнитного поля относительно ротора; Ω — угловая скорость ротора; $(\Omega_1 - \Omega)$ — угловая скорость поля относительно статора.

При симметричном расположении щеток α и β по отношению к осям фаз вторичной обмотки (A_2, B_2, C_2) ЭДС E_Δ находится в фазе (или противофазе) с ЭДС sE_2 , индуцированной потоком Φ во вторичной обмотке. Дополнительная ЭДС E_Δ пропорциональна длине дуги коллектора между щетками α и β данной фазы.

Для получения частоты вращения выше синхронной необходимо щетки α сместить по отношению к оси фазы (A_2, B_2, C_2) против направления вращения ротора, а щетки β — по направлению вращения.

При несимметричном смещении щеток по отношению к осям фаз статора во вторичную обмотку может быть введена дополнительная ЭДС, опережающая ЭДС sE_2 на 90° (совпадающая по фазе с потоком Φ), что приведет к улучшению коэффициента мощности $\cos \varphi_1$.

Двигатели выполняются на мощности от 1,5 до 150 кВт, в отдельных случаях — до 250 кВт. Нормальные пределы регулирования частоты вращения 2:1—4:1. Имеют жесткие механические характеристики при каждом положении щеток. При синхронной частоте вращения $\cos \varphi_1$ такой же, как у обычных асинхронных двигателей. При частоте вращения выше синхронной $\cos \varphi_1$ улучшается и может достигнуть 1. При частоте вращения ниже синхронной $\cos \varphi_1$ может получиться достаточно высоким лишь при несимметричном смещении щеток (что может быть осуществлено только в неререверсивных двигателях); КПД получается несколько ниже, чем в обычном двигателе, при синхронной частоте вращения и частоте вращения выше синхронной (за счет появления потерь на трение щеток и в пере-

ходных контактах и увеличения магнитных потерь). При частоте вращения ниже синхронной КПД существенно снижается.

Пуск в ход производится прямым присоединением к сети. В двигателях с нормальными пределами регулирования частоты вращения пусковой момент в 1,2—2 раза выше номинального момента. Пусковой ток превышает номинальный в 1,5—2 раза.

Двигатель Шраге — Рихтера находит применение в неререверсивных приводах с широким и плавным регулированием частоты вращения: в печатных машинах, в бумагоделательной промышленности, в текстильной и цементной промышленности.

Пределы регулирования частоты вращения в особых случаях расширяются до 50:1. Стоимость и габариты двигателя возрастают с расширением пределов регулирования частоты вращения.

Коллекторные двигатели могут работать в режиме генератора во всем диапазоне регулирования частоты вращения, отдавая энергию в сеть.

Описание других трехфазных коллекторных двигателей можно найти в [23.2, 24.13].

Список литературы

- 25.1. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник/А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
- 25.2. Алексеев Ю. В., Рабинович А. А. Краново-металлургические и экскаваторные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1985. 168 с.
- 25.3. Глебов И. А., Данилевич Я. Б. Научные проблемы турбогенеростроения. Л.: Наука, 1974. 280 с.
- 25.4. Глебов И. А., Быков В. М., Данилевич Я. Б. Турбогенераторы с полным водяным охлаждением — следующая ступень развития турбогенеростроения. — В кн.: Исследования генераторов с полным водяным охлаждением. Л.: ВНИИэлектромаш, 1983, с. 3—11.
- 25.5. Бобков Ю. А., Чемоданова Н. Б. Прогнозирование мирового технического уровня турбогенеростроения на 1990—2000 гг. — В кн.: Вопросы надежности и управления качеством мощных синхронных генераторов. Л.: ВНИИэлектромаш, 1982, с. 3—16.
- 25.6. Сверхпроводниковый турбогенератор типа КТГ-20 и результаты его испытаний/И. А. Глебов, В. М. Быков, И. П. Вишнев и др. — В кн.: Сверхпроводниковые электрические машины. Л.: ВНИИэлектромаш, 1983, с. 3—12.
- 25.7. Глебов И. А., Данилевич Я. Б., Шахтарин В. Н. Турбогенераторы с использованием сверхпроводимости. Л.: Наука, 1981. 231 с.
- 25.8. Криогенные электрические машины/А. С. Веселовский, В. И. Геминтер, Е. В. Лебедева и др.; под ред. Н. Н. Шереметевского. М.: Энергоатомиздат, 1985. 168 с.
- 25.9. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Высшая школа, 1976. 416 с.
- 25.10. Хрущев В. В. Электрические микромашины автоматических устройств. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 368 с.
- 25.11. Осин И. Л., Колесников В. П., Юферов Ф. М. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1976. 232 с.
- 25.12. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока/Н. П. Адполоткин, В. Т. Гращенков, Н. И. Лебедев, И. Е. Овчинников, А. К. Стыцина. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
- 25.13. Сударкин Г. Я., Ивченко Н. М. Асинхронные двигатели типа АДВ с внешним короткозамкнутым ротором. — Электротехническая промышленность. Серия Электрические машины, 1981, вып. 8 (126).
- 25.14. Орлов Е. Г., Колесников В. П., Кафтанаев В. Т. Однофазные тихоходные синхронные многополюсные микроэлектродвигатели для приборов и устройств общепромышленной автоматики. — Электротехническая промышленность. Серия Электрические машины, 1981, вып. 8 (126).
- 25.15. Однофазные реверсивные конденсаторные тихоходные синхронные многополюсные микроэлектродвигатели для приборов и устройств общепромыш-

ленной автоматики/Е. Г. Орлов, В. П. Колесников, В. Т. Кафтанатий, А. В. Летуновская, В. П. Хижняк. — Электротехническая промышленность. Серия Электрические машины, 1984, вып. 6 (169).

25.16. **Каталожно-справочные материалы «Электротехника СССР»**, серия 01. Электрические машины. М.: Информэлектро. (Действующие материалы указываются в Отраслевом указателе каталожно-справочных материалов «Электротехника СССР», ежегодно издаваемом Информэлектро).

25.17. **Прейскурант № 15-01**. Оптовые цены на машины электрические средней и малой мощности. М.: Прейскурантиздат, 1980. 331 с.

25.18. **Прейскурант № 15-02** Оптовые цены на машины электрические большой мощности, турбогенераторы, гидрогенераторы и компенсаторы синхронные. М.: Прейскурантиздат, 1980. 143 с.

25.19. **Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А.** Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. М.: Высшая школа, 1980. 359 с.

Раздел 26

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

СОДЕРЖАНИЕ

26.1. Исполнительные двигатели	408	нераторы (428). Тахогенераторы постоянного тока (423).	
Общие сведения (408). Асинхронные исполнительные двигатели (408). Исполнительные двигатели постоянного тока (413). Бесконтактные исполнительные двигатели постоянного тока (419). Шаговые исполнительные двигатели (420).		26.4. Электрические машины в схемах синхронной связи (сельсины)	430
26.2. Электромашинные усилители (ЭМУ)	423	Общие сведения (430). Однофазные контактные сельсины (431). Бесконтактные сельсины (431). Работа сельсинов в индикаторном режиме (434). Работа сельсинов в трансформаторном режиме (435). Схема синхронной связи с дифференциальными сельсинами (435). Магнесины (436).	
Классификация. Общие сведения (423). ЭМУ с независимым возбуждением (424). Электромашинный усилитель поперечного поля (425).		26.5. Вращающиеся трансформаторы	437
26.3. Тахогенераторы	426	Список литературы	441
Общие сведения (426). Синхронные тахогенераторы (427). Асинхронные тахоге-			

26.1. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Общие сведения

Исполнительными двигателями называются управляемые двигатели небольшой мощности, работающие в системах автоматики и предназначенные для преобразования электрического сигнала (напряжения управления или его фазы) в механическое перемещение вала.

Подавляющее большинство исполнительных двигателей (исключение составляют лишь двигатели с постоянными магнитами) имеют две обмотки. Одна из них постоянно находится под напряжением и называется *обмоткой возбуждения*. На другую — *обмотку управления* — электрический сигнал подается лишь тогда, когда необходимо вращение вала двигателя. От амплитуды сигнала управления или его фазы зависят частота вращения и вращающий момент исполнительного двигателя, а следовательно, и развиваемая им мощность. В силу того что исполнительные двигатели используются в следящих системах, они практически никогда не работают в номинальном режиме. Для их работы характерны пуски, остановки, реверсы. Частота вращения их обычно невелика и знакопеременна, поэтому они никогда не снабжаются вентиляторами для самовентиляции. С целью сокращения времени переходных процессов, в которых почти постоянно находятся исполнительные двигатели, их стремятся выполнить малоинерционными, малогабаритными.

Характер требований, предъявляемых к исполнительным двигателям, определяется спе-

цификой их работы в схемах. Основными из них являются: 1) отсутствие самохода — самоторможения двигателя при снятии сигнала управления; 2) широкий диапазон регулирования частоты вращения; 3) линейность регулировочных и механических характеристик; 4) устойчивость работы во всем диапазоне частот вращения двигательного режима; 5) большой пусковой момент; 6) малая мощность управления; 7) быстродействие; 8) надежность в работе; 9) малые габариты и масса.

В настоящее время в качестве исполнительных используются либо двухфазные асинхронные двигатели, либо синхронные — шаговые двигатели, либо двигатели постоянного тока.

Асинхронные исполнительные двигатели

Асинхронные исполнительные двигатели — это двухфазные двигатели, имеющие на статоре две сдвинутые в пространстве на электрический угол 90° обмотки (возбуждения и управления).

Необходимый для работы двигателя сдвиг токов обмоток во времени достигается либо схемой — при питании обмотки управления от усилителей, преобразователей, фазовращателей, либо с помощью конденсатора, который обычно включается последовательно с обмоткой возбуждения.

Управление исполнительными двигателями осуществляется либо путем изменения амплитуды напряжением управления, либо путем изменения его фазы, либо путем одновременно-

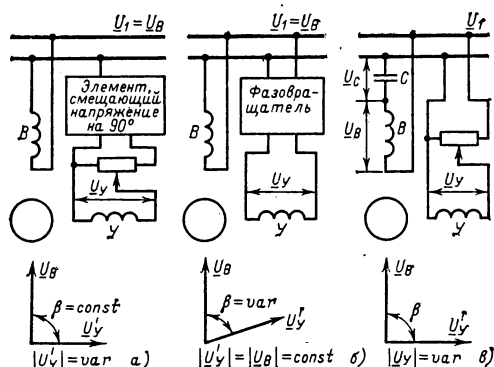


Рис. 26.1. Основные схемы включения асинхронных исполнительных двигателей

го изменения и амплитуды и фазы напряжения управления.

Первый способ управления называется *амплитудным* (рис. 26.1, а), второй — *фазовым* (рис. 26.1, б), третий — *амплитудно-фазовым*.

У исполнительных двигателей с конденсаторным сдвигом фазы токов в обмотках при изменении амплитуды напряжения управления одновременно автоматически изменяется по амплитуде и фазе напряжение непосредственно на обмотке возбуждения — после конденсатора (рис. 26.1, в), поэтому этот способ по существу является амплитудно-фазовым.

Наряду с рассмотренными выше тремя основными способами управления — регулированием частоты вращения асинхронных исполнительных двигателей на практике, хотя и значительно реже, находят применение и некоторые другие способы регулирования: регулирование пространственным сдвигом осей обмоток, подмагничиванием постоянным током, частотное регулирование, импульсное регулирование и др.

С целью обеспечения устойчивости работы двигателя во всем диапазоне частот вращения от $n=0$ до $n=\pm n_c$, расширения зоны регулирования, а также устранения самохода (вращения ротора двигателя при снятии сигнала управления) асинхронные исполнительные

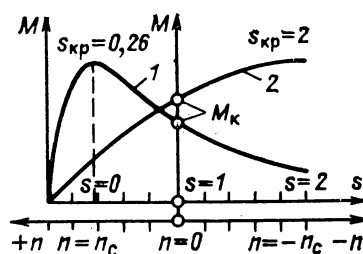


Рис. 26.2. Механические характеристики обычного (1) и исполнительного (2) асинхронных двигателей

двигатели выполняются с роторами, имеющими большое активное сопротивление. Критическое скольжение $s_{кр}$ асинхронных исполнительных двигателей в отличие от обычных асинхронных двигателей (у которых $s_{кр}=0,1 \div 0,3$) всегда больше единицы. На рис. 26.2 представлены для сравнения механические характеристики обычного — силового (1) и исполнительного (2) двигателей. Части характеристик, обеспечивающие устойчивую работу, выделены жирными линиями.

Увеличение активного сопротивления ротора, обеспечивая необходимые исполнительному двигателю свойства, приводит к уменьшению механической мощности на валу и КПД. Номинальная мощность исполнительного двигателя при одних и тех же габаритах примерно в 2—3 раза меньше номинальной мощности обычного двигателя.

Асинхронные исполнительные двигатели кроме обычного исполнения (рис. 26.3, а) часто имеют общий вал и выполняются в одном корпусе: с электромагнитным демпфером (рис. 26.3, б), с демпфирующим тахогенератором (рис. 26.3, в), с инерционным демпфером (рис. 26.3, г). Все перечисленные выше машины часто выполняются со встроенными понижающими механическими редукторами.

Основными характеристиками, определяющими рабочие свойства асинхронных исполнительных двигателей, являются механические, регулировочные, зависимости механической мощности от частоты вращения. Быстродейст-

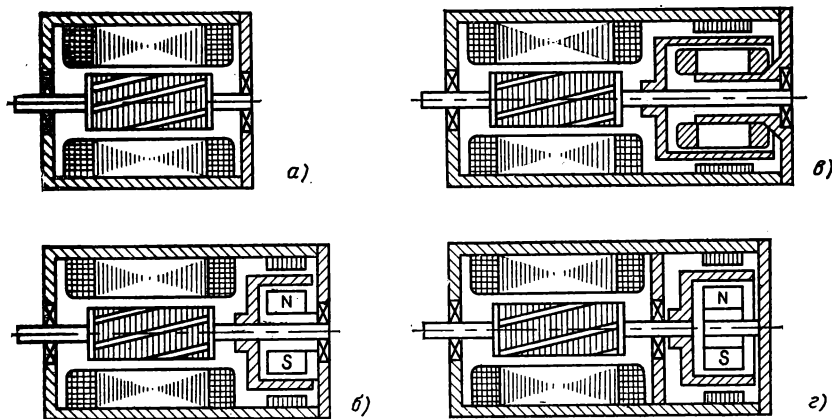


Рис. 26.3. Принципиальные конструктивные схемы асинхронных исполнительных двигателей различных модификаций

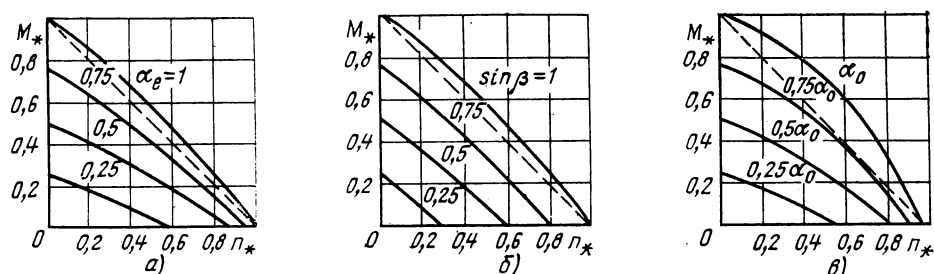


Рис. 26.4. Механические характеристики асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном (а), фазовом (б) и амплитудно-фазовом (в) способах управления

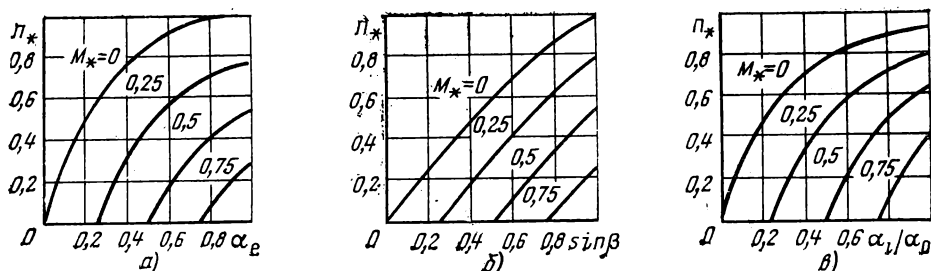


Рис. 26.5. Регулировочные характеристики асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном (а), фазовом (б) и амплитудно-фазовом (в) способах управления

вие двигателя характеризуется электро-механической постоянной времени T_m , равной времени разгона двигателя от момента включения обмотки управления до момента достижения ротором угловой скорости вращения, равной $0,633\Omega_x$ (где Ω_x — угловая скорость при холостом ходе, рад/с):

$$T_m = J \Omega_x / M_k;$$

J — момент инерции в кг·м²; M_k — пусковой момент, Н.

Механические характеристики — зависимости вращающего момента M от частоты вращения n при постоянном напряжении управления U_y : $M = f(n)$ при $U_y = \text{const}$.

На рис. 26.4 представлены механические характеристики асинхронного исполнительного двигателя при различных способах управления в относительных единицах [$M_* = f(n_*)$ при постоянных сигналах управления].

За единичные — базовые величины в системе относительных единиц приняты: пусковой момент при номинальном сигнале управления (круговом поле) — M_{k0} , синхронная частота вращения — n_c , номинальное напряжение управления $U_{y,ном}$ или его фаза $\psi = 90^\circ$ и мощность $P_{к0}$, потребляемая двигателем в момент пуска ($n = 0$) при круговом поле.

Момент M_* , частота вращения n_* и мощность P_* в относительных единицах выражаются как

$$M_{k*} = M / M_{k0}; \quad n_* = n / n_c; \quad P_* = P / P_{к0}.$$

Коэффициенты сигнала при различных способах управления выражаются по-разному. При амплитудном управлении $\alpha_e = U_y / U'_B$ — отношение напряжения управления U_y к на-

пряжению возбуждения, приведенному к числу витков обмотки управления U'_B . При фазовом управлении это $\sin \beta$, где β — угол сдвига во времени напряжений управления и возбуждения. При амплитудно-фазовом управлении $\alpha_e = U_y / U_{y0}$ — отношение напряжения управления U_y к напряжению управления U_{y0} , при котором имеет место круговое поле.

Механические характеристики асинхронных исполнительных двигателей (рис. 26.4) нелинейны, особенно при амплитудно-фазном управлении (рис. 26.4, в).

Регулировочные характеристики — зависимости частоты вращения от сигнала управления при постоянном моменте сопротивления. На рис. 26.5 представлены регулировочные характеристики асинхронных исполнительных двигателей при различных способах управления. Как видно из рис. 26.5, они при всех способах управления нелинейны. Наибольшей линейностью обладают характеристики при фазном управлении (рис. 26.5, б), наименьший — при амплитудно-фазовом (рис. 26.5, в).

Зависимости механической мощности от частоты вращения при постоянных сигналах управления для различных способов управления в относительных единицах представлены на рис. 26.6. Рассматривая их, нетрудно заметить, что максимальные мощности имеют место при частотах вращения, несколько превосходящих половину частоты вращения холостого хода. На практике обычно за номинальную мощность исполнительного двигателя принимается максимальная мощность при коэффициенте сигнала, равном единице.

По конструкции асинхронные исполнительные двигатели можно разделить на двигатели с полым немагнитным ротором, двигатели с ротором, имеющим короткозамкнутую

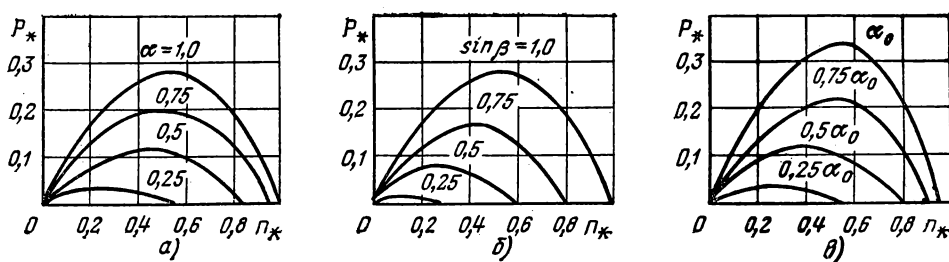


Рис. 26.6. Зависимости механической мощности на валу от частоты вращения асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном (а), фазовом (б) и амплитудно-фазовом (в) способах управления

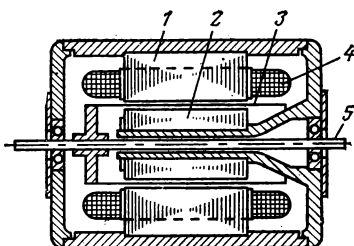


Рис. 26.7. Асинхронный исполнительный двигатель с полым немагнитным ротором:

1 — наружный статор; 2 — внутренний статор; 3 — ротор; 4 — обмотки возбуждения и управления; 5 — вал

обмотку, выполненную в виде беличьей клетки, и двигателя с массивным и полым ферромагнитными роторами.

Двигатели с полым немагнитным ротором (рис. 26.7) состоят из наружного 1 и внутреннего 2 статоров, набранных из штампованных листов электротехнической стали, в воздушном зазоре между которыми вращается полый ротор 3, выполненный из сплавов алюминия. Ротор имеет вид стакана, который своим дном укрепляется на валу, вращающемся в подшипниках и проходящем во внутреннем цилиндрическом отверстии одного из подшипниковых щитов, на цилиндрическом выступе которого располагается внутренний статор.

Обмотки управления и возбуждения располагаются в пазах, имеющих либо на внешнем, либо на внутреннем статоре. Иногда одна обмотка располагается в пазах внешнего, а другая — в пазах внутреннего статора. Обмотки выполняются (рис. 26.8) либо разделенными, либо (в случае расположения обмоток на одном из статоров) мостовыми.

Полый немагнитный ротор имеет весьма малый момент инерции, что обеспечивает хорошее быстродействие двигателя. Индуктивное

сопротивление немагнитного ротора, окруженного с двух сторон воздушными зазорами, очень мало: $x_R = (0,05 \div 0,1) r_R$. Последнее весьма положительно влияет на линейность механических и регулировочных характеристик двигателя. Так как ротор немагнитный, то он не испытывает сил радиального тяжения к ферромагнитным статорам, что обеспечивает плавность, бесшумность хода и надежность в работе.

Конструктивным недостатком двигателя с полым немагнитным ротором является большой немагнитный промежуток на пути потока между внешним и внутренним статорами, который складывается из двух воздушных зазоров (между ротором и статорами) и толщины немагнитного ротора. Наличием большого немагнитного промежутка на пути потока обуславливается большой намагничивающий ток, достигающий 80—90 % номинального, что приводит к снижению коэффициента мощности и КПД. Коэффициент мощности этих двигателей (при отсутствии конденсатора) не превосходит 0,4—0,5, а КПД — 20—40 %. Малый КПД объясняется, во-первых, большими потерями в обмотках статора от намагничивающего тока, во-вторых, большими электрическими потерями в роторе вследствие его большого активного сопротивления, что необходимо для устранения самохода.

В СССР разработано несколько серий исполнительных двигателей с полым немагнитным ротором как на промышленную (50 Гц), так и на повышенные частоты. Технические данные двигателей серии ЭМ представлены в табл. 26.1.

Асинхронные двигатели с обычным ротором, имеющим обмотку, выполненную в виде беличьей клетки, можно разделить на двигатели обычной конструкции (рис. 26.9) и двигатели «сквозной» конструкции (рис. 26.10).

Особенностью двигателей «сквозной» конструкции является то, что у них диаметр отверстий в подшипниковых щитах под подшипники (а в некоторых случаях под подшипники со специальными точно выполненными наружными втулками) и внутренний диаметр статора одинаковы. Они окончательно обрабатываются (шлифуются) уже после сборки двигателя одновременно. Последнее позволяет значительно уменьшить воздушный зазор между статором и ротором и тем самым повысить энергетические показатели (η и $\cos \phi$) и вращающий момент двигателя. Увеличение вращающего момента способствует уменьшению

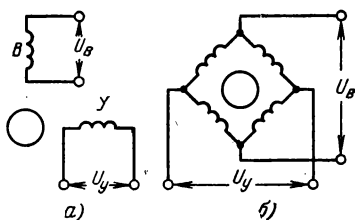


Рис. 26.8. Раздельная (а) и мостиковая (б) схемы обмоток асинхронных исполнительных двигателей

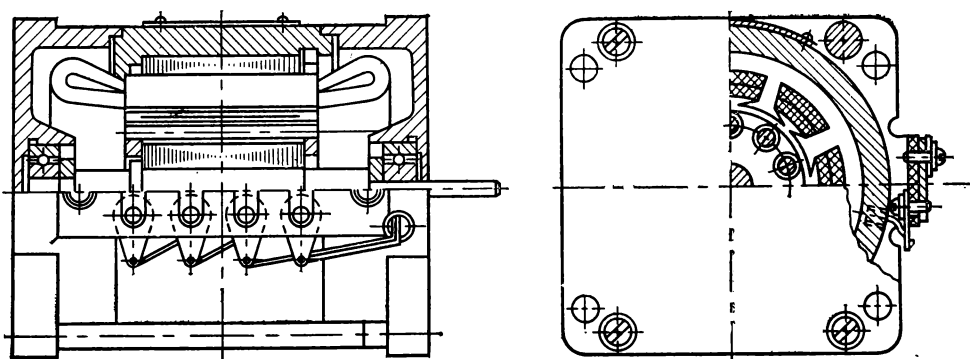


Рис. 26.9. Асинхронный исполнительный двигатель обычной конструкции с ротором, имеющим обмотку, выполненную в виде беличьей клетки, серии АСМ

постоянной времени двигателей и значительно-му увеличению их номинальной мощности без увеличения габаритов. Двигатели «сквозной» конструкции по быстродействию практически не уступают двигателям с полым немагнитным ротором.

В табл. 26.2 представлены технические данные исполнительных двигателей обычной

конструкции серии АСМ.

Двигатели с полым ферромагнитным ротором в отличие от двигателей с полым немагнитным ротором обычно не имеют внутреннего статора, так как их основной магнитный поток замыкается непосредственно по ротору. Иногда они выполняются и с внутренним статором. В этом случае в его пазах располага-

Таблица 26.1. Основные технические данные асинхронных исполнительных двигателей с полым немагнитным ротором серии ЭМ. Частота 400 Гц

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, Вт	n , об/мин	C , мкФ	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{п}}$, Н·м	$U_{\text{у.ном}}$, В	$I_{\text{у.ном}}$, А	$I_{\text{в.ном}}$, А	$T_{\text{эм}}$, с	Масса, кг
ЭМ-05	0,4	2000	0,25	2,0	4	115	0,035	0,16	0,025	0,26
ЭМ-1	0,65	2000	0,3	3,2	6,5	115	0,055	0,25	0,03	0,30
ЭМ-2	1,65	2000	0,5	8,0	17	115	0,11	0,35	0,035	0,55
ЭМ-2-12	2,3	5000	0,35	4,5	6,5	50	0,125	0,25	0,09	0,3
ЭМ-4	3,7	2000	0,8	18	30	115	0,15	0,5	0,08	0,85
ЭМ-4А	2,87	2000	0,75	14	28	115	0,16	0,5	0,04	0,8
ЭМ-8	8,2	4000	1,8	20	45	50	0,42	0,9	0,045	1,25
ЭМ-8-12	8,0	6000	0,75	13	18	50	0,25	0,35	0,045	0,55
ЭМ-15	13,1	4000	2,5	32	60	50	0,65	1,2	0,05	1,55
ЭМ-25	28,8	4000	3,0	58	76	50	0,85	1,3	0,1	2,7
ЭМ-25А	23,8	4000	3,0	58	—	50	0,85	1,3	0,1	2,7
ЭМ-50	41,0	5000	4,5	80	90	50	1,45	2,0	0,17	4,6
ЭМ-0,2-М	0,257	2500	0,3	1,0	2,0	60	0,2	0,15	0,02	0,16
ЭМ-0,5-М	0,512	2000	0,25	2,5	3,5	60	0,15	0,2	0,015	0,25
ЭМ-1-М	1,03	2500	0,3	4,0	7,0	60	0,2	0,25	0,015	0,30
ЭМ-2-М	1,85	4000	0,45	6,0	15	60	0,25	0,30	0,02	0,40
ЭМ-4-М	4	3300	0,75	12	—	60	0,30	0,45	0,025	0,55
ЭМ-8-М	—	—	0,8	—	52	80	0,80	0,50	0,03	0,8
ЭМ-15-М	15,2	4000	1,5	37	60	80	0,90	1,0	—	1,26
ЭМ-25-М	25	4200	2,4	58	90	80	1,2	1,2	0,04	1,65
ЭМ-50-М	46,2	5000	3,0	90	120	80	2,0	0,05	0,05	2,7
ЭМ-21-М	0,28	—	3,0	—	—	36	0,4	0,7	—	0,7
ЭМ-21-2	0,28	—	3,0	—	—	36	0,4	0,7	—	0,7

Примечания: 1. Срок службы двигателей серии ЭМ 400 ч.

2. У двигателей ЭМ-21-1 и ЭМ-21-2 номинальное напряжение 36 В, у остальных — 115 В.

Таблица 26.2. Основные технические данные асинхронных исполнительных двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора в виде беличьей клетки типа АСМ. Частота 50 Гц

Тип двигателя	$U_{\text{ном}}$, В	$P_{\text{ном}}$, Вт	$I_{\text{ном}}$, А	$U_{\text{тр}}$, В	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{п}}$, Н·м	n , об/мин	Основные размеры, мм					Масса, кг	Оптовая цена, руб.
								L корпуса	l вала	d вала	H высота	B ширина		
АСМ-50	20	0,67	0,9	0,5	5,0	22,5	1300	86	13	4	58	73,5	0,72	8,4
АСМ-50	110	0,67	0,095	5,5	5,0	22,5	1300	86	13	4	58	73,5	0,72	8,4
АСМ-100	110	1,32	0,18	5,5	10,0	40,0	1280	115	13	4	58	73,5	1,15	8,5
АСМ-200	110	2,4	0,30	5,5	20,0	56,0	1180	104	16	6	70	85,5	1,25	8,5
АСМ-400	110	4,6	0,40	5,5	40,0	80,0	1120	139	16	6	70	85,5	1,9	10

Примечания: 1. Двигатели АСМ имеют на статоре две совершенно одинаковые обмотки (фазы), сдвинутые в пространстве на электрический угол 90°.

2. Исполнение двигателей — закрытое.

3. Срок службы 500 ч.

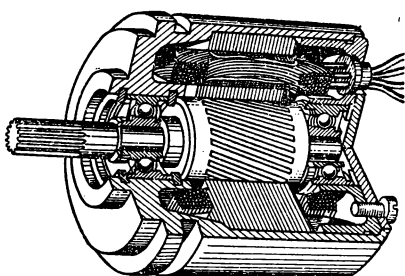


Рис. 26.10. Асинхронный исполнительный двигатель «сквозной» конструкции с ротором, имеющим обмотку, выполненную в виде беличьей клетки

ется одна из обмоток (возбуждения или управления).

Особенностью двигателей с полым ферромагнитным ротором является то, что они имеют более линейные механические и регулировочные характеристики. По своему быстродействию, а также по энергетическим показателям они уступают другим исполнительным двигателям.

Исполнительные двигатели постоянного тока

К положительным свойствам двигателей постоянного тока, способствующим их широкому распространению, можно отнести следующее: они позволяют получать теоретически любые частоты вращения, обеспечивая устойчивую работу в широком диапазоне; имеют линейные механические, а при определенных схемах включения и регулировочные характеристики, высокий КПД; не имеют самохода; по габаритам и массе в 2—3 раза меньше асинхронных исполнительных двигателей; обладают значительным пусковым моментом и в ряде конструктивных исполнений небольшой постоянной времени.

Основным недостатком исполнительных двигателей постоянного тока является наличие скользящих контактов — коллектора и щеток, что уменьшает надежность работы, стабильность характеристик, приводит к излучению радиопомех, к необходимости периодического ухода за двигателями и т. п.

По способу возбуждения исполнительные двигатели постоянного тока делятся на двигатели с независимым электромагнитным возбуждением и двигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

У двигателей с независимым возбуждением в качестве обмотки управления используется либо обмотка якоря — *двигатели с якорным управлением* (рис. 26.11, а), либо обмотка полюсов — *двигатели с полюсным управлением* (рис. 26.11, б).

У двигателей, возбуждаемых постоянными магнитами, обмотка возбуждения отсутствует, поэтому они всегда работают при якорном управлении.

Основные характеристики исполнительного двигателя при якорном управлении в относительных единицах представлены на рис. 26.12. Момент M_* , частота вращения n_* , мощность $P_* = M_* n_*$ и напряжение управления — коэффициент сигнала α выражены как отношения действительных величин к базовым, за которые приняты соответственно пусковой момент при номинальном напряжении управления $U_{y,ном}$, частота вращения n_x при холостом ходе (при $M=0$ и $U_y = U_{y,ном}$) и номинальное напряжение управления $U_{y,ном}$.

Механические регулировочные характеристики исполнительных двигателей постоянного тока при якорном управлении являются прямыми линиями. Линейность механических и регулировочных характеристик является весьма

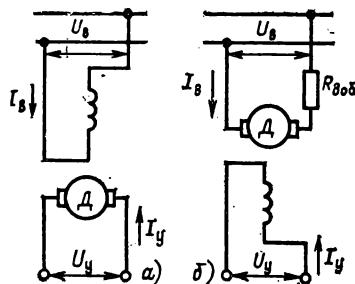


Рис. 26.11. Схемы включения исполнительных двигателей постоянного тока при якорном (а) и полюсном (б) способах управления

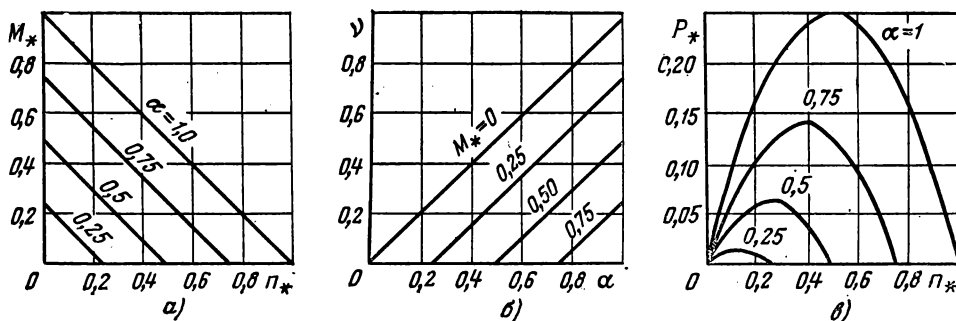


Рис. 26.12. Основные характеристики исполнительного двигателя постоянного тока при якорном управлении:

а — механические; б — регулировочные; в — зависимости механической мощности от частоты вращения

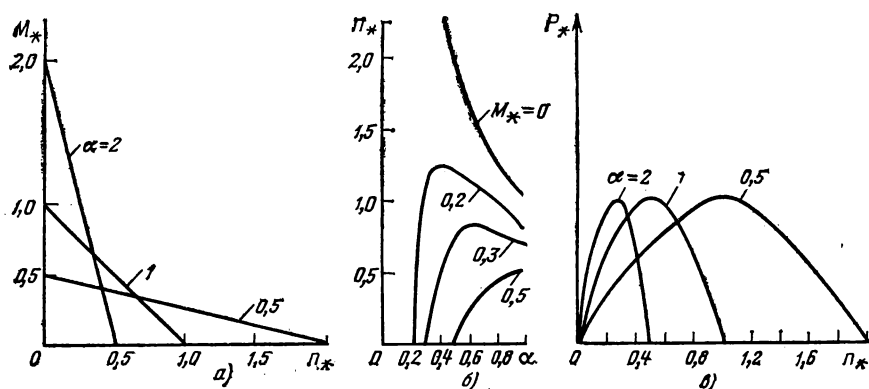


Рис. 26.13. Основные характеристики исполнительного двигателя постоянного тока при полюсном управлении:

a — механические; *б* — регулировочные; *в* — зависимости механической мощности на валу от частоты вращения

ценным качеством двигателей с якорным управлением. Таких характеристик не имеет ни один другой исполнительный двигатель ни переменного, ни постоянного тока.

Максимальная механическая мощность на валу двигателя (рис. 26.12, *в*) зависит от напряжения управления — коэффициента сигнала α . В относительных единицах $P_{*max} = \alpha^2/4$.

Недостатком исполнительного двигателя при якорном управлении является его большая мощность управления. Она равна сумме механической мощности на валу, потерь в стали и меди якоря, т. е., по существу, всей потребляемой двигателем мощности за вычетом потерь в обмотке возбуждения.

Основные характеристики исполнительного двигателя при полюсном управлении представлены на рис. 26.13.

Механические характеристики (рис. 26.13, *a*) линейны, однако их жесткость (наклон) не остается постоянной при изменении напряжения управления (α).

Регулировочные характеристики (рис. 26.13, *б*) нелинейны, а при малых моментах сопротивления M_* и неоднозначны. Это недостаток двигателя с полюсным управлением. С целью получения однозначности обычно эти

двигатели используются при $M_* \leq 0.5$. Недостатком двигателей при полюсном управлении является также то, что они не могут работать на холостом ходу, так как при отсутствии момента сопротивления и снятии сигнала управления идут вразнос — теоретически частота вращения n_* стремится к бесконечности.

Максимум механической мощности двигателей при полюсном управлении (рис. 26.13, *в*) не зависит от сигнала управления.

Положительным свойством двигателей с полюсным управлением является их малая мощность управления. Она равна лишь электрическим потерям в обмотке полюсов.

По конструкции якоря исполнительные двигатели постоянного тока можно разделить на двигатели с обычным якорем, двигатели с гладким беспазовым якорем и малоинерционные двигатели с цилиндрическим или дисковым якорями.

Особенностью всех исполнительных двигателей является то, что они имеют ненасыщенную магнитную цепь, что необходимо для исключения влияния реакции якоря на основные характеристики.

Исполнительные двигатели с электромагнитным возбуждением и обычным якорем

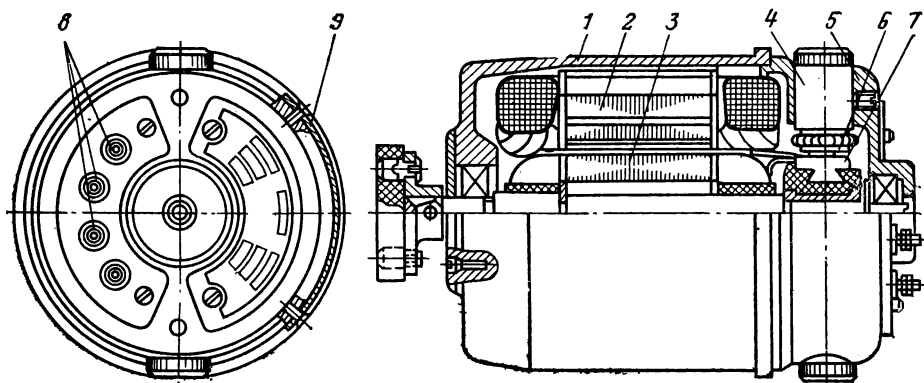


Рис. 26.14. Исполнительный двигатель постоянного тока серии СЛ:

1 — корпус; 2 — полюс; 3 — якорь; 4 — щеткодержатель; 5 — подшипниковый щит; 6 — щетка; 7 — коллектор; 8 — колодка зажимов; 9 — крышка смотрового люка

Таблица 26.3. Основные технические данные серии ПБС исполнительных двигателей постоянного тока общепромышленного назначения

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт (при $U_{\text{ном}}=220\text{ В}$), при n , об/мин					Габариты, мм			Масса		
	1000	1500	2200	3000	4000	Высота	Ширина	Длина ПБСТ	Длина ПБС	ПБС	ПБСТ
ПБС-01	0,07	0,10	0,15	0,20	0,30	172	222	335	—	15	—
ПБС-02	0,12	0,18	0,25	0,32	0,40	172	222	370	—	18	—
ПБС-12	0,18	0,28	0,40	0,50	0,60	210	264	397	—	23	—
ПБС-13	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85	210	264	427	—	29	—
ПБС-22	0,40	0,60	0,8	1,00	1,15	310	330	440	595	41	51
ПБС-23	0,55	0,85	1,1	1,35	1,65	310	330	470	695	48	58
ПБС-32	0,8	1,2	1,6	2,1	2,5	336	365	542	697	62	72
ПБС-33	1,0	1,6	2,3	2,9	3,4	336	365	582	737	72	82
ПБС-42	1,4	2,1	3,0	3,5	4,0	360	410	575	730	88	98
ПБС-43	2,0	3,0	4,0	4,8	5,4	360	410	620	775	112	122
ПБС-52	2,5	4,0	5,8	7,0	—	400	455	615	765	127	137
ПБС-53	3,5	5,3	7,7	9,5	—	400	455	665	815	154	164
ПБС-62	4,8	7,3	10,0	13,5	—	484	520	655	805	195	205
ПБС-63	6,5	10	14,5	17	—	484	520	770	850	240	250

(рис. 26.14) по конструкции отличаются от силовых двигателей постоянного тока общего назначения лишь тем, что имеют шихтованные — набранные из листов электротехнической стали не только якорь, но и спинку статора и полюсы, что необходимо из-за работы двигателей в переходных режимах.

В СССР разработано и выпускается несколько серий исполнительных двигателей постоянного тока с электромагнитным возбуждением. Это МИ, СЛ, ПБС, ДВИ и др. Многие двигатели средней и большой мощности (МИ, ПБС) выпускаются со встроенными в них тахогенераторами (табл. 26.3).

Исполнительные двигатели с постоянными магнитами не имеют обмотки возбуждения, а следовательно, и потерь на возбуждение. Вследствие этого они имеют более высокий КПД. Даже при номинальных мощностях в единицы ватт он достигает 60—70 %. По габаритам двигатели с постоянными магнитами меньше, чем аналогичные по номинальной мощности и частоте вращения двигатели с электромагнитным возбуждением.

Длительное время двигатели с постоянными магнитами из-за высокой стоимости материала магнита типа ЮНДК выпускались лишь на небольшие мощности. В последнее время получили широкое распространение недорогие ферритобариевые магниты с высокой удельной энергией за счет большой коэрцитивной силы. Это позволило проектировать и выпускать двигатели с постоянными магнитами больших номинальных мощностей (на десятки киловатт).

Разработана и выпускается серия высокомоментных исполнительных двигателей постоянного тока с постоянными магнитами малых и больших мощностей. Двигатели этой серии имеют встроенные тахогенераторы.

На рис. 26.15 представлены микродвигатели постоянного тока с постоянными магнитами серии ДПМ, а в табл. 26.4 приведены основные технические данные двигателей этой серии.

Микродвигатели серии ДПМ получили достаточно широкое распространение, хотя и разрабатывались не для массового производства. Их недостатком является то, что они нетехнологичны, содержат сравнительно дорогой коль-

цевой постоянный магнит из сплава типа ЮНДК и вследствие этого имеют сравнительно высокую стоимость, что ограничивает области их применения.

В последние годы в СССР разработана серия ДП микродвигателей постоянного тока исполнения РО9 с дешевыми ферробариевыми постоянными магнитами. Двигатели серии ДП исполнения РО9 весьма технологичны, что позволяет механизировать и автоматизировать их производство. По своим характеристикам (табл. 26.5) двигатели серии ДП исполнения РО9 весьма близки к двигателям серии ДПМ (см. табл. 26.4, рис. 26.15). Двигатели серии ДП исполнения РО9 предназначены для массового производства.

Исполнительные микродвигатели постоянного тока с гладким беспазовым якорем появились сравнительно недавно. Отличительной особенностью этих двигателей является то, что обмотка якоря у них располагается не в пазах (они отсутствуют), а непосредственно на гладкой цилиндрической поверхности якоря, укрепляясь на ней с помощью клея-компаунда и бандажей.

Такое расположение обмотки значительно уменьшает ее индуктивность, что приводит к улучшению коммутации и к уменьшению электрохимической постоянной времени — повышению быстродействия двигателя. Недостатком двигателя с гладким беспазовым якорем явля-

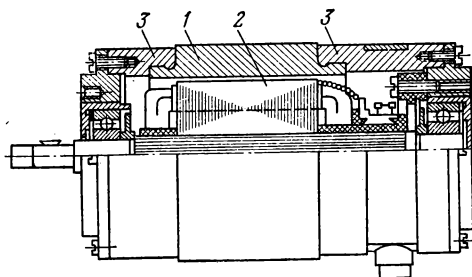


Рис. 26.15. Исполнительный двигатель с постоянными магнитами серии ДПМ:

1 — постоянный магнит; 2 — якорь с коллектором; 3 — концевые части корпуса из цинкового сплава

Таблица 26.4. Основные технические данные микродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами серии ДПМ исполнений Н1, Н2

Тип двигателя	Номинальные данные				I_{Σ} , А	Пусковые данные		Срок службы, ч
	$U_{\text{ном}}$, В	$M_{\text{ном}}$, мН·м	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$I_{\text{ном}}$, А		$M_{\text{п}}$, мН·м	$I_{\text{п}}$, А	
ДПМ-20-Н1/Н2-01	29	0,5	9000	0,075	0,05	6	0,7	300
ДПМ-20-Н1/Н2-02	27	1	4000	0,07	0,05	2	0,25	700
ДПМ-20-Н1/Н2-04	6	0,2	2000	0,06	0,05	0,6	0,33	1000
ДПМ-20-Н1/Н2-05	14	0,2	2000	0,05	0,04	1	0,14	1000
ДПМ-20-Н1/Н2-06	27	1,5	9000	0,15	0,06	6	1	300
ДПМ-20-Н1/Н2-07	27	2,0	6000	0,15	0,05	5	0,65	500
ДПМ-20-Н1/Н2-08	27	2	4500	0,15	0,06	4	0,4	600
ДПМ-20-Н1/Н2-11	12	1,5	9000	0,35	0,13	6	2,3	300
ДПМ-20-Н1/Н2-12	12	2	6000	0,3	0,12	5	1,7	500
ДПМ-20-Н1/Н2-12А	14	1,8	600	0,25	0,11	5	1,1	500
ДПМ-20-Н1/Н2-13	12	1,5	4500	0,25	0,11	4	0,9	600
ДПМ-20-Н1/Н2-14	12	1	2500	0,1	0,05	2	0,35	1000
ДПМ-20-Н1/Н2-16	6	1	9000	0,55	0,3	6	4,3	300
ДПМ-20-Н1/Н2-17	6	1,5	6000	0,5	0,25	6	2,6	500
ДПМ-25-Н1/Н2-01	29	3,5	9000	0,25	0,08	15	2,6	300
ДПМ-25-Н1/Н2-02	27	3,0	3800	0,1	0,04	10	0,7	900
ДПМ-25-Н1/Н2-02А	27	1	4500	0,06	0,04	10	0,7	800
ДПМ-25-Н1/Н2-03	12	4,5	6000	0,6	0,2	10	3,8	400
ДПМ-25-Н1/Н2-04	27	5	2500	0,15	0,04	8	0,5	1000
ДПМ-25-Н1/Н2-05	15	5	2500	0,22	0,07	8	0,9	1000
ДПМ-25-Н1/Н2-06	27	5	6000	0,3	0,09	15	1,9	500
ДПМ-25-Н1/Н2-07	27	5	4500	0,22	0,06	12	1,1	800
ДПМ-25-Н1/Н2-09	12	3,5	9000	0,65	0,23	15	6,2	200
ДПМ-25-Н1/Н2-10	12	5	4500	0,52	0,16	12	2,5	800
ДПМ-25-Н1/Н2-10А	14	5	4500	0,45	0,13	12	2	800
ДПМ-25-Н1/Н2-11	12	5	2500	0,28	0,09	8	1,2	1000
ДПМ-30-Н1/Н2-01/02	29	7	9000	0,5	0,18	35	5,9	200
ДПМ-30-Н1/Н2-02/01	27	10	2600	0,25	0,06	20	1,1	1000
ДПМ-30-Н1/Н2-03	27	10	4500	0,5	0,13	30	2,5	600
ДПМ-30-Н1/Н2-04	26	10	5500	0,5	0,2	25	3,2	500
ДПМ-30-Н1/Н2-05	27	7	600	0,4	0,15	25	3,4	500
ДПМ-30-Н1/Н2-08	12	7	9000	1,2	0,4	35	14,2	100
ДПМ-30-Н1/Н2-09	12	10	6000	1,2	0,35	35	8,3	300
ДПМ-30-Н1/Н2-10	12	10	4500	1	0,32	25	5,2	600
ДПМ-30-Н1/Н2-10А	14	10	4500	0,8	0,2	28	5,2	600
ДПМ-30-Н1/Н2-11	12	10	2500	0,6	0,17	20	2,4	1000
ДПМ-35-Н1/Н2-01	27	15	9000	1,3	0,3	70	12	100
ДПМ-35-Н1/Н2-02	27	15	3500	0,45	0,09	50	2,8	800
ДПМ-35-Н1/Н2-03	6	23	1800	2	0,45	35	7,4	1000
ДПМ-35-Н1/Н2-04	27	20	6000	1,1	0,26	60	6,8	200
ДПМ-35-Н1/Н2-05	27	20	4500	0,85	0,21	50	4,8	600
ДПМ-35-Н1/Н2-06	27	20	2500	0,53	0,12	35	2,2	800
ДПМ-35-Н1/Н2-08	12	15	9000	2,8	0,75	70	22	50
ДПМ-35-Н1/Н2-09	12	20	6000	2,2	0,55	60	14	100
ДПМ-35-Н1/Н2-10	12	20	4500	1,6	0,42	50	10,5	500
ДПМ-35-Н1/Н2-11	12	20	2500	1,15	0,27	35	5,2	1000

Примечания: 1. Первые две цифры в обозначении типа равны диаметру корпуса в мм; последние две цифры — номер исполнения; Н1 — двигатели с одним, а Н2 — двигатели с двумя выходными концами вала.

2. Длины корпусов: ДПМ-20—38 мм; ДПМ-25—45,5 мм; ДПМ-30—57 мм; ДПМ-35—64,5 мм.

Таблица 26.5. Основные технические данные микродвигателей постоянного тока, возбуждаемых постоянными магнитами, с обычным ферромагнитным якорем серии ДП...Р09

Тип двигателя	$U_{\text{ном}}$, В	$M_{\text{ном}}$, мН·м	I , А, не более	n , об/мин	$M_{\text{п}}$, не менее	Срок службы, ч, не менее	Масса, г, не более	L корпуса, мм	D корпуса, мм	Выступаящий конец вала, мм	D вала, мм	Оптовая цена, руб.
ДП20-0,6-4-6-1М3681-Р09	6	150	0,285	4000±600	460	1000	56	61,8	20	10	3	9,5
ДП20-1-6-6-1М3681-Р09	6	160	0,440	6000±900	600	500	56	61,8	20	10	3	9,5
ДП20-1,6-10-6-1М3681-Р09	6	160	0,660	10 000±1500	950	100	56	61,8	20	10	3	9,5
ДП20-0,6-4-12-1М3681-Р09	12	150	0,160	4000±600	400	1000	56	61,8	20	10	3	9,5
ДП20-1,6-6-12-1М3681-Р09	12	160	0,230	6000±900	600	500	56	61,8	20	10	3	9,5
ДП20-1,6-10-12-1М3681-Р09	12	160	0,340	10 000±1500	950	100	56	61,8	20	10	3	9,5
ДП20-1-6-27-1М3681-Р09	27	160	0,105	6000±900	600	500	56	61,8	20	10	3	9,5
ДП20-1,6-10-27-1М3681-Р09	27	160	0,155	10 000±1500	900	100	56	61,8	20	10	3	9,5
ДП25-1,6-3-12-1М3681-Р09	12	520	0,315	3000±450	1400	1000	100	69,6	25	10	3	9,6
ДП25-2,5-6-12-1М3681-Р09	12	400	0,420	6000±900	2200	500	100	69,6	25	10	3	9,6
ДП25-4-10-12-1М3681-Р09	12	390	0,650	10 000±1500	2900	100	100	69,6	25	10	3	9,6
ДП25-1,6-3-27-1М3681-Р09	27	520	0,150	3000±450	1300	1000	100	69,6	25	10	3	9,6
ДП25-2,5-6-27-1М3681-Р09	27	400	0,180	6000±900	2400	500	100	69,6	25	10	3	9,6
ДП25-4-10-27-1М3681-Р09	27	390	0,290	10 000±1500	2900	250	100	69,6	25	10	3	9,6
ДП32-4-3-12-1М3681-Р09	12	1300	0,650	3000±450	4500	750	193	82	32	12	4	9,8
ДП32-6-6-12-1М3681-Р09	12	1000	0,880	6000±900	6200	250	193	82	32	12	4	9,8
ДП32-10-10-12-1М3681-Р09	12	1000	1,400	10 000±1500	8000	100	193	82	32	12	4	9,8

Продолжение табл. 26.5

Тип двигателя	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$M_{\text{ном}}, \text{мН} \cdot \text{м}$	$I, \text{А, не более}$	$n, \text{об/мин}$	$M_{\text{п}}, \text{не менее}$	Срок службы, ч, не менее	Масса, г, не более	L корпуса, мм	D корпуса, мм	Выступающий конец вала, мм	D вала, мм	Оптовая цена, руб.
ДП32-4-3-27-1М3681-Р09	27	1300	0,300	3000 ± 450	4000	750	193	82	32	12	4	9,8
ДП32-6-6-27-1М3681-Р09	27	1000	0,390	6000 ± 900	6500	250	193	82	32	12	4	9,8
ДП32-10-10-27-1М3681-Р09	27	1000	0,640	$10\ 000 \pm 1500$	8500	100	193	82	32	12	4	9,8
ДП40-10-3-12-1М3681-Р09	12	3250	1,47	3000 ± 450	10 000	250	320	87	40	12	4	10,3
ДП40-16-6-12-1М3681-Р09	12	2600	2,10	6000 ± 900	14 000	100	320	87	40	12	4	10,3
ДП40-10-3-27-1М3681-Р09	27	3250	0,67	3000 ± 450	10 000	500	320	87	40	12	4	10,3
ДП40-16-6-27-1М3681-Р09	27	2600	0,95	6000 ± 900	15 000	250	320	87	40	12	4	10,3
ДП40-25-10-27-1М3681-Р09	27	2450	1,43	$10\ 000 \pm 1500$	20 000	100	320	87	40	12	4	10,3

Примечания: 1. Двигатели могут иметь конструктивное исполнение с двумя выходными концами вала. В этом случае в обозначении двигателя после цифры 8 ставится цифра 2. Например, ДП20-0,6-4-6-1М3682-Р09.

2. Цифры (или их группы) и буквы (или их группы) в обозначении двигателя означают: ДП — двигатель постоянного тока; число после ДП (20) — наружный диаметр корпуса, мм; следующие числа (0,6) — номинальная мощность, Вт; затем (4) — частота вращения, тысячи об/мин; далее (1М3681) — крепление и конструктивные особенности двигателя; Р09 — конструкция якоря (якорь обычный); Р11

(см. рис. 26.17) — якорь полый цилиндрический; Р13 (см. рис. 26.19) — якорь дисковый с обычной обмоткой.

3. Условия эксплуатации двигателей типов ДП...Р09 и ДП...Р11 (см. табл. 26.7): максимальная температура окружающей среды $+60^\circ\text{C}$; минимальная температура окружающей среды -50°C ; верхнее значение относительной влажности воздуха 98 % при 25°C ; пониженное атмосферное давление — 53 600 Па; вибрационные нагрузки в диапазоне частоты 1—200 Гц с ускорением 50 м/с²; ударные нагрузки с ускорением 150 м/с² и длительностью ударного импульса 2—15 мс.

ется наличие значительного немагнитного промежутка на пути потока полюсов, который здесь складывается из воздушного зазора и толщины обмотки якоря.

Разработана серия МИГ таких двигателей, которые выпускаются рядом заводов различных министерств.

Недостатком всех рассмотренных выше двигателей постоянного тока является большой момент инерции якоря, набираемого из листов электротехнической стали. С целью устранения этого недостатка в последнее время в производстве двигателей малых мощностей начали переходить к малоинерционным якорям, не содержащим стали, — создавать малоинерционные двигатели постоянного тока, которые в зависимости от их конструктивного исполнения можно разделить на двигатели с цилиндрическим и дисковым якорями.

Малоинерционный исполнительный двигатель постоянного тока с полым якорем (рис. 26.16) по своей конструкции напоминает асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором (рис. 26.7). У него также имеются наружный и внутренний статоры, в воздушном зазоре между которыми располагается цилиндрическая часть полого якоря, выполненного в виде стакана, который сво-

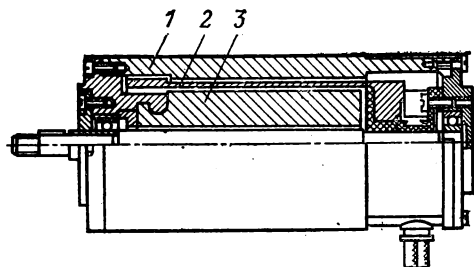


Рис. 26.16. Малоинерционный исполнительный двигатель постоянного тока с полым якорем серии ДПР: 1 — ядро; 2 — полый якорь; 3 — постоянный магнит

им дном укрепляется на валу, проходящем внутри отверстия внутреннего статора.

В зависимости от технологии изготовления малоинерционных якорей их можно разделить на два вида: с обмоткой обычного типа, выполненной из обычных изолированных провод-

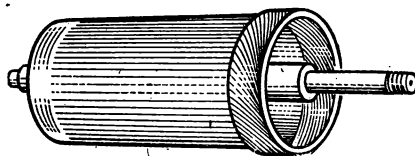


Рис. 26.17. Полый цилиндрический якорь с обычной обмоткой

ников, скрепленных эпоксидными смолами (рис. 26.17), и с печатной обмоткой, выполненной из медной фольги электрохимическим путем (рис. 26.18). Концы секций обмотки якоря присоединяются к пластинам коллектора, укрепленного на валу.

В табл. 26.6 представлены основные технические данные микродвигателей с полым якорем, имеющим обычную обмотку, серии ДПР, которые получили в настоящее время достаточно широкое распространение.

В табл. 26.7 представлены основные технические данные двигателей с полым якорем серии ДП исполнения Р11, разработанной в последние годы. Двигатели серии ДП исполнения Р11 имеют более технологичную, чем двигатели серии ДПР, конструкцию, меньшую стоимость. Они предназначены для массового производства.

Малоинерционные микродвигатели с полыми якорями имеют ряд положительных свойств. Они обладают хорошим быстродействием из-за малого момента инерции якоря и малой индуктивности обмотки якоря, не содержащего ферромагнитных материалов,

Таблица 26.6. Основные технические данные малоинерционных исполнительных микродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами с полым якорем серии ДПР

Обозначения двигателя	Номинальные данные				Ток холостого хода I_x , А	Пусковой режим		Срок службы, ч
	$U_{ном}$, В	$M_{ном}$, мН·м	$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$, А		M_p , мН·м	I_p , А	
ДПР-2-Н1/Н2-01	12	1	9000	0,145	0,035	4	0,9	500
ДПР-2-Н1/Н2-02	12	1,2	6000	0,13	0,03	3	0,59	1000
ДПР-2-Н1/Н2-05	6	1	9000	0,29	0,085	4	1,85	500
ДПР-2-Н1/Н2-06	6	1	6000	0,23	0,063	2,6	1	1000
ДПР-2-Н1/Н2-07	6	1	4500	0,175	0,04	2,6	0,75	2000
ДПР-2-Н1/Н2-08	6	1	2500	0,13	0,025	2	0,46	3000
ДПР-2-Н1/Н2-13	6	0,2	6000	0,066	0,04	1,6	0,75	2000
ДПР-32-Н1/Н2-01	27	2	9000	0,14	0,05	13	1,13	500
ДПР-32-Н1/Н2-02	27	2,5	6000	0,12	0,035	10	0,66	1000
ДПР-32-Н1/Н2-03	27	2,5	4500	0,095	0,025	7,5	0,41	2000
ДПР-32-Н1/Н2-05	12	2	9000	0,3	0,1	15	2,8	600
ДПР-32-Н1/Н2-06	12	2	6000	0,2	0,06	11	1,46	1000
ДПР-32-Н1/Н2-07	12	2	4500	0,16	0,045	6,6	0,84	2000
ДПР-32-Н1/Н2-08	12	2	2500	0,115	0,03	4,6	0,38	3000
ДПР-42-Н1/Н2-01	27	5	9000	0,29	0,08	36	3	500
ДПР-42-Н1/Н2-02	27	5	6000	0,2	0,048	22	1,35	1000
ДПР-42-Н1/Н2-03	27	5	4500	0,16	0,035	17	0,9	2000
ДПР-42-Н1/Н2-04	27	5	2500	0,11	0,023	10,7	0,39	3000
ДПР-42-Н1/Н2-05	12	5	9000	0,66	0,185	30	5,8	400
ДПР-42-Н1/Н2-06	12	5	6000	0,45	0,106	24	3,3	800
ДПР-42-Н1/Н2-07	12	5	4500	0,35	0,08	19	2,1	1500
ДПР-42-Н1/Н2-08	12	5	2500	0,24	0,05	11,7	0,92	2500
ДПР-52-Н1/Н2-01	27	10	9000	0,53	0,1	12	10	500
ДПР-52-Н1/Н2-02	27	10	6000	0,36	0,07	87	5,25	1000
ДПР-52-Н1/Н2-03	27	10	4500	0,26	0,045	75	3,25	2000
ДПР-52-Н1/Н2-04	27	10	2500	0,16	0,025	42	1,15	3000
ДПР-52-Н1/Н2-05	12	10	9000	1,2	0,25	108	19,6	400
ДПР-52-Н1/Н2-06	12	10	6000	0,8	0,16	81	11,7	800
ДПР-52-Н1/Н2-07	12	10	4500	0,6	0,145	68	6,6	1500
ДПР-52-Н1/Н2-08	12	10	2500	0,35	0,055	51	2,9	2500
ДПР-62-Н1/Н2-01	27	20	9000	1	0,18	200	13	300
ДПР-62-Н1/Н2-02	27	20	6000	0,72	0,12	170	9,6	600
ДПР-62-Н1/Н2-03	27	20	4500	0,55	0,086	147	6,2	1500
ДПР-62-Н1/Н2-04	27	20	2500	0,33	0,05	82	2,15	2500
ДПР-62-Н1/Н2-05	12	20	9000	2,4	0,4	190	27	500
ДПР-62-Н1/Н2-06	12	20	6000	1,5	0,27	177	18,4	500
ДПР-62-Н1/Н2-07	12	20	4500	1,2	0,19	125	11,9	1000
ДПР-62-Н1/Н2-08	12	20	2500	0,73	0,11	81	4,7	2000
ДПР-72-Н1/Н2-02	27	40	6000	1,35	0,17	350	16,5	500
ДПР-72-Н1/Н2-03	27	40	4500	1	0,12	3000	13,3	1000
ДПР-72-Н1/Н2-04	27	40	2500	0,6	0,09	190	4,7	2000
ДПР-72-Н1/Н2-06	12	40	6000	3	0,38	320	24	500
ДПР-72-Н1/Н2-07	12	40	4500	2,2	0,25	280	23	1000
ДПР-72-Н1/Н2-08	12	40	2500	1,3	0,15	185	10,2	2000

Примечания: 1. Первая цифра, стоящая после обозначения серии, обозначает габарит двигателя, вторая — число полюсов; цифры 1 и 2, стоящие после буквы Н, указывают на число выходящих концов вала; последние цифры означают номер исполнения двигателя.

2. Кроме двигателей с нормальным исполнением (в смысле крепления), обозначенных буквой Н, все

двигатели, кроме двигателей второго габарита (ДПР-2), выпускаются также с фланцевым креплением. В обозначении двигателя в этом случае буква Н заменяется буквой Ф, например ДПР-32-Ф1-01 вместо ДПР-32-Н1-01.

3. Двигатели ДПР могут использоваться в качестве тахогенераторов.

В двигателях отсутствуют потери в стали, малы механические потери, так как якорь не испытывает радиальных сил тяжения. Двигатели возбуждаются постоянными магнитами, поэтому у них нет потерь на возбуждение. Все это обеспечивает очень высокий КПД.

Из-за малой индуктивности обмотки якоря двигателя обладают хорошей (практически безыскровой) коммутацией.

Малоинерционные микродвигатели с дисковыми якорями (рис. 26.19, 26.20) отличаются от аналоговых двигателей с цилиндрическими

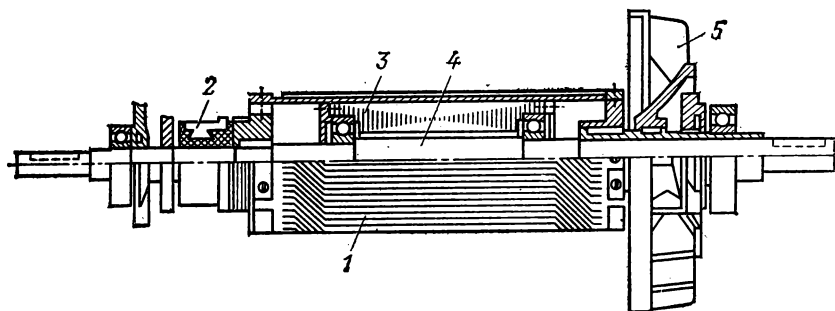


Рис. 26.18. Полый цилиндрический якорь с печатной обмоткой (в сборе):

1 — цилиндр из изоляционного материала с печатной обмоткой; 2 — коллектор; 3 — сердечник внутреннего статора; 4 — вал; 5 — вентилятор

Таблица 26.7. Основные технические данные микродвигателей постоянного тока, возбуждаемых постоянными магнитами, с полым немагнитным якорем серии ДП...Р11

Тип двигателя	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$M_{\text{ном}}, \text{мН} \cdot \text{м}$	$I_{\text{ном}}, \text{А}$, не более	n , об/мин	$M_{\text{п}}, \text{мН} \cdot \text{м}$, не менее	Срок службы, ч, не менее	Масса, г, не более	Длина корпуса, мм	Диаметр корпуса, мм	Выступавший конец вала, мм	Диаметр вала, мм	Оптовая цена, руб.
ДП20-1-4-12-1М3681-Р11	12	2,5	0,19	4000 ± 600	9,0	2000	83	65	20	10	3	20,5
ДП20-1,6-6-12-1М3681-Р11	12	2,5	0,27	6000 ± 900	11,5	1000	83	65	20	10	3	20,5
ДП25-2,5-4-12-1М3681-Р11	12	6,0	0,39	4000 ± 600	28	2000	150	75,6	25	10	3	21,6
ДП25-4-6-12-1М3681-Р11	12	6,5	0,60	6000 ± 900	36	1000	150	75,6	25	10	3	21,6
ДП25-2,5-4-27-1М3681-Р11	27	6,0	0,17	4000 ± 600	26	2000	150	75,6	25	10	3	21,6
ДП25-4-6-27-1М3681-Р11	27	6,5	0,27	6000 ± 900	37	1000	150	75,6	25	10	3	21,6
ДП32-6-3-12-1М3681-Р11	12	1,95	0,96	3000 ± 450	6,5	2000	320	94	32	12	4	23,0
ДП32-10-6-12-1М3681-Р11	12	1,60	1,34	3000 ± 900	12	1000	320	94	32	12	4	23,0
ДП32-6-6-27-1М3681-Р11	27	1,95	0,42	6000 ± 450	8	2000	320	94	32	12	4	23,0
ДП32-10-6-27-1М3681-Р11	27	1,60	0,57	3000 ± 900	12	1000	320	94	32	12	4	23,0
ДП40-16-3-12-1М3681-Р11	12	5,20	2,14	3000 ± 450	22	1000	600	106	40	12	4	25,7
ДП40-25-6-12-1М3681-Р11	12	4,00	2,96	6000 ± 900	28	750	600	106	40	12	4	25,7
ДП40-16-3-27-1М3681-Р11	27	5,20	0,94	3000 ± 450	22	1500	600	106	40	12	4	25,7
ДП40-25-6-27-1М3681-Р11	27	4,00	1,30	6000 ± 900	28	1000	600	106	40	12	4	25,7

ми якорями своим конструктивным исполнением. Это двигатели торцевого типа. Дисковые якоря могут иметь либо обычную (рис. 26.19), либо печатную обмотку (рис. 26.20, рис. 26.21). Двигатели с дисковым якорем обладают практически теми же свойствами, что и микродвигатели с цилиндрическими якорями. Особенностью двигателя с дисковым якорем, имеющим печатную обмотку, является то, что у него может отсутствовать коллектор. В этом

случае щетки скользят непосредственно по проводникам печатной обмотки якоря (рис. 26.20). В табл. 26.8 приведены основные технические данные малоинерционных микродвигателей постоянного тока серии ДП исполнения Р13 с дисковым якорем, имеющим обычную обмотку (ДП...Р13).

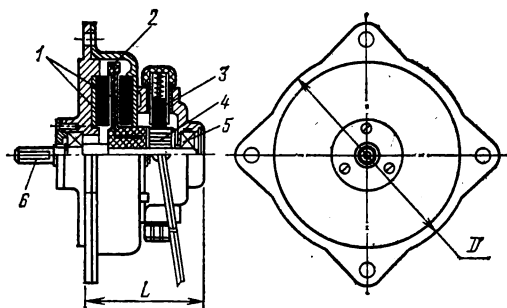


Рис. 26.19. Двигатель постоянного тока типа ДП...Р13 с дисковым якорем, имеющим обычную обмотку:

1 — кольцевые магниты, намагниченные в аксиальном направлении; 2 — дисковый якорь; 3 — щетка; 4 — коллектор; 5 — подшипник; 6 — вал

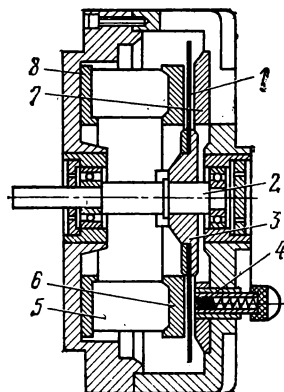
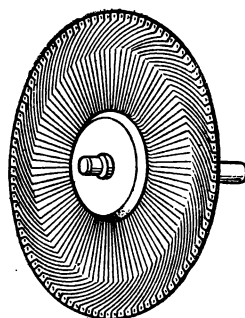


Рис. 26.20. Двигатель постоянного тока с дисковым якорем, имеющим печатную обмотку:

1 — дисковый якорь; 2 — вал; 3 — втулка; 4 — щеткодержатель; 5 — постоянные магниты; 6 — полюсные наконечники; 7, 8 — кольцевые магнитопроводы — ярма

Рис. 26.21. Дисковый якорь с печатной обмоткой



Возбуждение малоинерционных исполнительных двигателей, как правило, осуществляется с помощью постоянных магнитов. Применение электромагнитного возбуждения нецелесообразно, так как для проведения основного магнитного потока через большой немагнитный промежуток, состоящий из двух воздушных зазоров и немагнитного якоря, требуется весьма значительная магнитодвижущая сила, создание которой с помощью обмотки возбуждения неэкономично из-за большого тока, а следовательно, и больших электрических потерь в ней.

Бесконтактные исполнительные двигатели постоянного тока

Бесконтактные исполнительные двигатели постоянного тока появились сравнительно недавно, но в настоящее время уже получили достаточно широкое распространение. В отличие от контактных эти двигатели не имеют коллектора и щеток, что обеспечивает их более надежную работу в условиях тряски, вибрации, резких изменений температур и других условий окружающей среды, значительно

Таблица 26.8. Основные технические данные малоинерционных исполнительных микродвигателей постоянного тока с дисковым якорем, имеющим обычную обмотку, серии ДП...Р13

Тип двигателя	$U_{\text{НОМ}}$, В	$P_{\text{НОМ}}$, Вт	$M_{\text{НОМ}}$, Н·м	$M_{\text{П}}$, Н·м	$I_{\text{НОМ}}$, А	КПД при номинальном моменте, %	Габаритные размеры $D \times L$, мм	Масса, кг
ДП-105-25-3-12-Р13	12	25	8	32	5,1	40	105×60	0,95
ДП-105-25-3-24-Р13	24	25	8	40	2,9	40	105×60	0,95
ДП-105-40-3-12-Р13	12	40	13	65	7,0	47	105×70	1,15
ДП-105-40-3-24-Р13	24	40	13	70	3,5	47	105×70	1,15
ДП-105-40-3-48-Р13	48	40	13	76	1,8	47	105×70	1,15
ДП-105-40-3-60-Р13	60	40	13	62	1,4	47	105×70	1,15
ДП-105-40-3-110-Р13	110	40	13	78	0,76	47	105×70	1,15
ДП-105-60-3-12-Р13	60	60	19	140	9,8	50	125×75	1,7
ДП-125-60-3-24-Р13	24	60	19	128	4,7	50	125×75	1,7
ДП-126-60-3-48-Р13	48	60	19	86	2,5	50	125×75	1,7
ДП-125-60-3-60-Р13	60	60	19	69	1,97	50	125×75	1,7
ДП-125-60-3-110-Р13	110	60	19	48	1,1	50	125×75	1,7
ДП-150-90-3-12-Р13	12	90	29	250	14	53	150×80	2,45
ДП-150-90-3-24-Р13	24	90	29	270	7	53	150×80	2,45
ДП-150-120-3-12-Р13	12	120	39	250	18	55	150×80	2,45
ДП-150-120-3-24-Р13	24	120	39	270	9	55	150×80	2,45

Примечание. Номинальная частота вращения $3000 \pm \frac{600}{300}$ об/мин; номинальный режим работы — продолжительный; номинальная наработка 3000 ч.

Таблица 26.9. Основные технические данные бесконтактных исполнительных (управляемых) микродвигателей постоянного тока серии ДБУ со встроенным редуктором

Тип двигателя	$P_{\text{НОМ}}$, Вт	Передачное число редуктора	n_x , об/мин	T , мс	КПД, %, при $P_{\text{НОМ}}$ не менее
ДБУ-0,6	0,6	—	2400	12—14	30
ДБУ-0,6-4	0,6	4,0	575	12—14	30
ДБУ-0,6-10,5	0,6	10,5	219	12—14	30
ДБУ-0,6-32,1	0,6	32,1	72	12—14	30
ДБУ-0,6-81	0,6	81,0	28	12—14	30
ДБУ-0,6-171	0,6	171,0	14	12—14	30
ДБУ-1,0	1,0	—	2700	10—11	35
ДБУ-1,0-4	1,0	4,0	650	10—11	35
ДБУ-1,0-10,5	1,0	10,5	248	10—11	35
ДБУ-1,0-32,5	1,0	32,1	81	10—11	35
ДБУ-1,0-81	1,0	81,0	32	10—11	35
ДБУ-1,0-171	1,0	171,0	15	10—11	35

Примечание. Срок службы — 10 лет. Средний ресурс до списания — 25 000 ч. Габаритные размеры (мм): электромеханической части без редуктора $\varnothing 25 \times 60$, редуктора $\varnothing 25 \times 25$, коммутатора $90 \times 90 \times 20$. Массы: общая 0,3 кг, редуктора 0,07 кг, коммутатора 0,08 кг. Момент инерции без редуктора $0,8 \cdot 10^{-6}$ кг·м².

повышает срок службы, обеспечивает надежную работу при высоких частотах вращения, достигающих десятков и сотен тысяч оборотов в минуту.

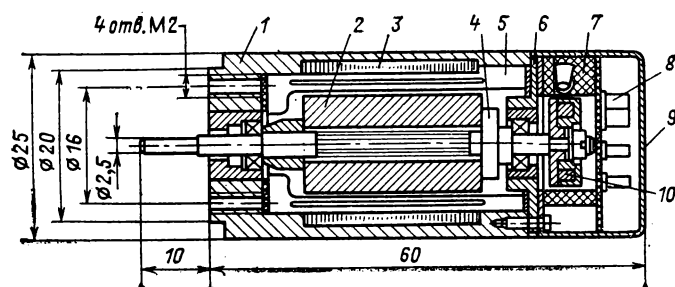


Рис. 26.22. Бесконтактный исполнительный двигатель типа ДБУ:

1 — корпус; 2 — индуктор (двух-полюсный постоянный магнит); 3 — сердечник статора; 4 — вал; 5 — обмотка якоря, расположенная в немагнитном зазоре; 6 — подшипниковый щит; 7 — обойма датчика положения ротора, где установлено три чувствительных элемента; 8 — колодка зажимов; 9 — кожух колодки зажимов; 10 — один из сигнальных элементов датчика положения ротора (постоянный магнит)

Более подробно о бесконтактных двигателях постоянного тока см. в § 25.20.

В табл. 26.9 представлены технические данные одной из серий бесконтактных исполнительных двигателей постоянного тока со встроенным понижающим механическим редуктором, а на рис. 26.22 — в продольном разрезе один из двигателей серии (без редуктора).

Шаговые исполнительные двигатели

В схемах автоматики в настоящее время наряду с автоматическими системами непрерывного действия, осуществляемыми с помощью рассмотренных выше обычных исполнительных двигателей, широко применяются системы дискретного (импульсного) действия. Такие системы осуществляются с помощью специальных исполнительных двигателей, получивших название шаговых (ШД).

Шаговые двигатели — это электромеханические устройства, преобразующие электрические импульсы напряжения управления в дискретные (скачкообразные) угловые или линейные перемещения ротора с возможной его фиксацией в нужных положениях.

ШД весьма разнообразны как по конструкции, так и по принципу действия. Первые ШД выполнялись в виде электромагнита, приводящего во вращение храповое колесо, которое за одно включение магнита под напряже-

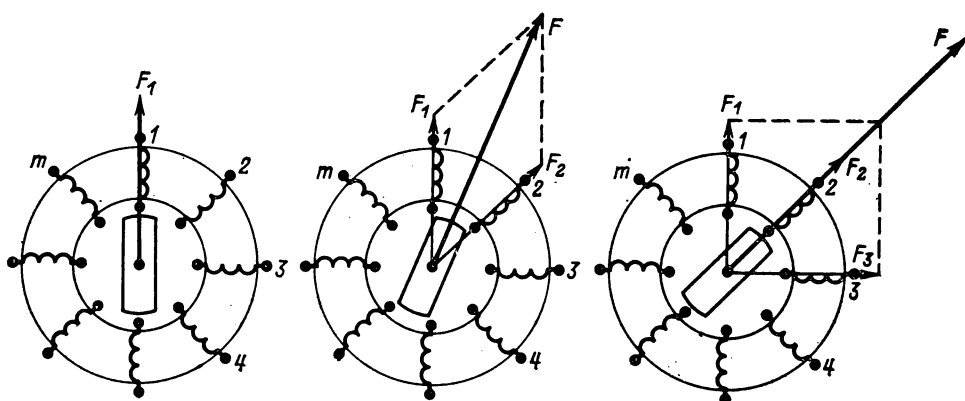
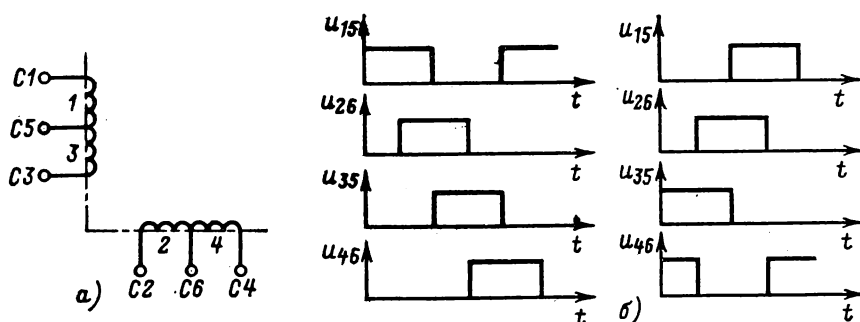
Рис. 26.23. К вопросу о принципе действия m -фазного шагового двигателя

Рис. 26.24. Схема обмоток (а) и порядок коммутации (б) двухфазного шагового двигателя типа ШД-2-1

ние (за один такт) перемещалось на вполне определенный угол — шаг, который определялся зубцовым шагом храпового колеса. Такие ШД применяются и сейчас. Однако наряду с ними применяются и другие более сложные ШД.

Современные быстродействующие ШД — это по своему существу специальные многофазные многополюсные синхронные двигатели, у которых в отличие от обычных синхронных двигателей нет пусковой короткозамкнутой обмотки, что объясняется частотным (импульсным), а не асинхронным их пуском.

Роторы ШД могут быть возбужденными — активными и невозбужденными — пассивными. Возбуждение чаще всего осуществляется с помощью постоянных магнитов, хотя может быть и электромагнитным (в этом случае необходимы контактные кольца и щетки). На рис. 26.23 изображен схематично m -фазный ШД при различных положениях невозбужденного пассивного ротора. Обмотки двигателя, как и у большинства ШД, питаются несинусоидальными импульсами напряжения, частота и скважность которых может изменяться в широких пределах коммутатором, через который осуществляется питание ШД.

Питание обмоток может быть однополярным и двухполярным. В первом случае напряжение изменяется от нуля до $+U$, во втором — от $+U$ до $-U$. Современные электронные коммутаторы могут обеспечивать питание обмоток статора либо порознь, либо группами в

различных сочетаниях. Каждому такту коммутации соответствуют вполне определенные значение и направление результирующей МДС F и вполне определенное положение ротора.

Управление ШД, при котором обмотки включаются поочередно равными группами, называется *симметричным*. Поочередное включение неравных групп обмоток называют *несимметричным* управлением.

Управление ШД может быть либо потенциальным, либо импульсным. При *потенциальном* управлении напряжение на обмотках изменяется в момент поступления управляющего сигнала-команды. При отсутствии последующего управляющего сигнала обмотки остаются под напряжением и ротор занимает вполне определенное положение. При *импульсном* управлении обмотки, возбужденные сигналом-импульсом, по истечении некоторого времени автоматически обесточиваются.

Современные коммутаторы позволяют переходить от потенциального к импульсному, от симметричного к несимметричному способам управления, от питания одной обмотки к питанию нескольких обмоток. Все это позволяет в широких пределах менять шаг двигателя, производить его реверс, торможение, фиксацию и т. п.

На рис. 26.24 представлены в качестве примера схема обмотки и порядок коммутации двухфазного ШД типа ШД-2-1.

Режимы работы шаговых двигателей определяются характером движения их роторов, за-

висящим от частоты и характера изменения управляющих сигналов. Различают четыре режима работы ШД.

Статический, при котором по обмоткам статора протекает постоянный ток. Ротор в этом случае занимает вполне определенное фиксированное положение, от которого может отклоняться под действием нагрузки на угол θ , зависящий от нагрузки.

Квазистатический режим — режим отработки единичных шагов, при котором переходные процессы, сопровождающие отработку шага, к началу следующего шага полностью заканчиваются так, что скорость перемещения ротора в начале каждого шага равна нулю.

Установившийся режим — режим, соответствующий постоянной частоте управляющих сигналов. Ротор ШД в этом режиме, имея постоянную скорость перемещения, может совершать как периодические, так и аperiodические колебания.

Переходные режимы — пуск, ускорение, замедление, реверс — являются основными эксплуатационными режимами работы ШД. Основным требованием, которое предъявляется к ШД в переходных режимах, является требование отсутствия потери шага.

Для каждого ШД существует вполне определенная максимальная частота коммутации (частота подачи сигналов управления), при которой ротор из состояния покоя или вращения следует еще за дискретно перемещающимся полем статора без потери шага. Эту частоту принято называть *частотой приемистости*. Среднюю скорость перемещения ротора, соответствующую частоте приемистости, обычно называют *скоростью приемистости*. Частота и скорость приемистости являются весьма важными параметрами, характеризующими ШД.

Не менее важными обобщенными параметрами, характеризующими работу ШД, являются также частота собственных колебаний, электромагнитная постоянная времени и коэффициент внутреннего демпфирования.

Частота собственных колебаний зависит от момента инерции ротора J , амплитуды статического синхронизирующего момента M_m и числа пар полюсов p :

$$\omega_0 = \sqrt{pM_m/J}.$$

Электромагнитная постоянная времени T_0 определяется отношением индуктивности обмоток L_0 (обычно под L_0 понимается постоянная составляющая индуктивности) к их активному сопротивлению R :

$$T_0 = L_0/R.$$

Коэффициент внутреннего демпфирования D определяется как отношение амплитуды изменения потокоцепления Ψ_m ротора с фазой обмотки статора в функции положения ротора к активному сопротивлению фазы обмотки статора: $D = \Psi'/R$.

Рабочие характеристики ШД в связи с многообразием их рабочих режимов весьма многочисленны. В их число включаются статические характеристики, предельные динамические характеристики, предельные механические характеристики, а также характеристики устойчивости при работе в резонансных областях.

Конструкции ШД, выпускаемых в настоящее время, весьма разнообразны. По своему существу это синхронные двигатели, работающие в несколько отличных от обычных синхронных двигателей режимах, что накладывает отпечатки на их конструктивное исполнение — роторы имеют минимальные диаметры, не имеют пусковых обмоток, двигатели рассчитываются на большие электромагнитные нагрузки, выполняются с большой степенью точности и т. п.

По числу фаз — обмоток управления ШД можно разделить на однофазные, двухфазные и многофазные.

По типу роторов они делятся на активные (возбужденные) и пассивные (невозбужденные). Активные ШД делятся на двигатели с постоянными магнитами и двигатели с электромагнитным возбуждением, пассивные — на индукторные и реактивные, по числу пакетов стали магнитопровода — на однопакетные и двухпакетные, по способу фиксации ротора при обесточенных обмотках управления — на двигатели с внутренней и внешней фиксацией.

ШД можно разделить на группы также по ряду других признаков.

На рис. 26.25 представлены конструкции шаговых двигателей некоторых типов.

Выпускаются несколько серий самых различных ШД. Технические данные некоторых из них представлены в табл. 26.10—26.12.

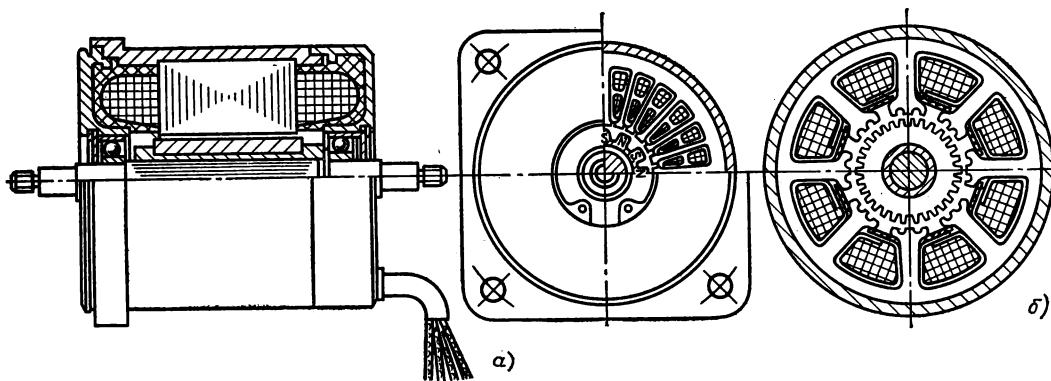


Рис. 26.25. Шаговые двигатели:

а — с активным ротором в виде магнита-звездочки; б — индукторного типа

Таблица 26.10. Шаговые двигатели типа ШДА. ($m=4$, $U_{\text{ном}}=14/28$ В, шаг $22,5^\circ$)

Тип двигателя	$M_{\text{м}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$J_{\text{рот}}, 10^{-6}$ $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	$f_{\text{пр}}, \text{шаг/с}$	$P_{\text{м}}, \text{Вт}$	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
ШДА-1А, ШДА-1	0,016	30	410	10	32×48	0,12
ШДА-2А, ШДА-2	0,04	70	360	13	38×58	0,2
ШДА-3А, ШДА-3	0,10	200	315	20	46×62	0,32
ШДА-4А, ШДА-4	0,16	350	290	35	53×71	0,49
ШДА-5А, ШДА-5	0,25	650	240	60	61×76	0,73
ШДА-6А, ШДА-6	0,40	1000	230	90	70×80	1,2
ШДА-7А, ШДА-7	0,60	1500	220	140	81×90	1,5

Примечания: 1. Частота приемистости $f_{\text{пр}}$ указана при холостом ходе, без форсирующих сопротивлений в фазах.

2. Двигатели ШДА выпускаются в модификации ШДА-Ф с фиксированным моментом в обесточенном состоянии.

Таблица 26.11. Шаговые двигатели типов ДШ, ДШР, ДИР, ДРШ

Тип двигателя	m	Шаг	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$M_{\text{м}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$J_{\text{рот}}, 10^{-6}$ $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	$f_{\text{пр}}, \text{шаг/с}$	$P_{\text{м}}, \text{Вт}$	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
ДШ-0,025	2/4	22,5°	13,5/27	0,03	2,5	600	20	40×57	0,22
ДШ-0,025А	4		27,0	0,02		550			
ДШ-0,04	2/4	22,5	13,5/27	0,04	3,5	550	20	40×67	0,25
ДШ-0,04А	4		27,0	0,035		510			
ДШ-0,1	2/4	22,5	13,5/27	0,012	19,5	430	30	50×80	0,50
ДШ-0,1А	4		27,0	0,008		390			
ДШ-0,25	2/4	22,5	13,5/27	0,24	58,0	300	45	60×95	0,90
ДШ-0,25А	4		27,0	0,15		270			
ДШ-0,4	2/4	22,5	13,5/27	0,25	125,0	250	75	80×100	1,60
ДШ-0,4А	4		27,0	0,21		225			
ДШ-1	2/4	22,5	13,5/27	0,70	420,0	200	120	100×130	3,0
ДШ-1А	4		27,0	0,60		175			
ДШ-4А	4	18	27,0	1,60	$1,38 \cdot 10^3$	150	250	120×192	8,1
ДШ-6А	4	18	27,0	2,60	$3,9 \cdot 10^3$	100	275	155×200	11,5
ДШ-10А	4	18	27,0	3,50	$5,8 \cdot 10^3$	100	300	155×248	14,8
ДШР-0,025	4	36	27,0	0,01	1,0	100	11	38×59	0,125
ДИР-1А	2	36	27,0	0,015	1,0	100	13	36×52	0,16
ДИР-1Б	2	3,6	27,0	0,15	1,0	100	13	36×52	0,16
ДРШ-0,025А	4	5,0	13,5	0,015	0,7	2500	30	45×38	0,36

Примечания: 1. Частота приемистости $f_{\text{пр}}$ указана при холостом ходе.

2. Цена шага при 4-тактной коммутации.

3. Двигатели ДШР-0,25, ДИР-1А и ДИР-1Б имеют встроенный редуктор.

Таблица 26.12. Шаговые двигатели типа ШД

Тип двигателя	m	Шаг	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$M_{\text{ном}}, \text{Н}\cdot\text{см}$	$J_{\text{рот}}, 10^{-6}$ $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	$f_{\text{пр}}, \text{шаг/с}$	$P_{\text{м}}, \text{Вт}$	Масса, кг
ШД-10/100	4	15°	14	0,1	2	100	2,2	0,08
ШД-1Б	2	15	25	0,07	2	400	7,0	0,14
ШД-1С	4	15	27	0,1	2	100	5,5	0,14
ШД-1ЕМ	4	15	14	0,15	2	250	3,2	0,25
ШД-1А	2	15°	25	1,5	80	100	6,5	0,46
ШД-75/300	3	3	24	0,75	120	300	14,0	0,18
ШД-300/300	3	3	24	3,0	120	300	36,0	0,30
ШД-2	3	6	12	25,0	$80 \cdot 10^3$	70	170,0	4,20

Примечания: 1. Частота приемистости $f_{\text{пр}}$ указана при условиях номинальных значений момента сопротивления и момента инерции нагрузки.

2. Двигатель ШД-2 имеет обгонную муфту.

26.2. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ (ЭМУ)

Классификация. Общие сведения

Электромашинные усилители — это специальные электрические генераторы постоянного тока, мощность на выходе которых регулируется путем изменения мощности управления, во много раз меньшей выходной мощности.

Электромашинные усилители (ЭМУ) весьма разнообразны как по устройству, так и по принципу действия. По числу ступеней усиления их можно разделить на одно-, двух- и трехступенчатые ЭМУ, по направлению потока возбуждения выходной ступени — на ЭМУ продольного и поперечного поля.

Электромашинные усилители продольного поля можно в свою очередь разделить на одноступенчатые ЭМУ с независимым возбужде-

нием и с самовозбуждением, двух- и трехступенчатые одноякорные ЭМУ, каскадные ЭМУ и т. д.

Конструктивно ЭМУ часто выполняются в одном корпусе с приводным электродвигателем.

Основными требованиями, которые предъявляются к ЭМУ, являются малая мощность управления, хорошее быстродействие, большая перегрузочная способность, обеспечивающая возможность форсировки в процессе регулирования.

Основные эксплуатационные свойства ЭМУ характеризуются коэффициентом усиления, постоянной времени, коэффициентом добротности и степени возможной форсировки.

Коэффициент усиления — это отношение какой-либо величины на выходе к соответствующей ей величине на входе (обмотке управления). Основным коэффициентом усиления является коэффициент усиления по мощности $k_y = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$, который обычно называется просто коэффициентом усиления. Он равен произведению коэффициентов усиления по току k_{yI} и по напряжению k_{yU} : $k_y = k_{yI} k_{yU}$.

Постоянная времени ЭМУ T является функцией постоянных времени отдельных ступеней усиления T_1, T_2 и т. д. Постоянные времени отдельных ступеней определяются отношением индуктивностей отдельных электрических цепей к их активным сопротивлениям: $T_1 \approx L_1/R_1$; $T_2 \approx L_2/R_2$ и т. д.

В современных ЭМУ постоянные времени колеблются от сотых долей секунды в мало-мощных усилителях (до 1 кВт) до десятых долей секунды в усилителях мощностью в десятки киловатт.

Коэффициентом добротности ЭМУ называется отношение коэффициента усиления по мощности к сумме постоянных времени отдельных ступеней усиления: $k_d = k_y/(T_1 + T_2 + \dots + T_N)$. Следует заметить, что сумма постоянных времени отдельных ступеней может служить мерой при сравнении ЭМУ, но не является постоянной времени ЭМУ в целом ($T_1 + T_2 + \dots + T_N \neq T$). Коэффициент добротности возрастает с увеличением мощности ЭМУ, достигая значений сотен тысяч с^{-1} . Он зависит от типа ЭМУ, числа его ступеней и т. д.

Степень возможной форсировки ϕ характеризуется перегрузочная способность ЭМУ. Степень форсировки по току ϕ_I или напряжению ϕ_U называется отношение максимально допустимых тока или напряжения на выходе к их номинальным значениям.

Большим преимуществом электромашинных усилителей по сравнению с электронными усилителями является то, что они допускают значительные форсировки как по току, так и по напряжению, чего не могут допустить большинство электронных усилителей.

Степень форсировки ЭМУ, имеющих коллектор, обычно ограничивается условиями коммутации. С целью увеличения ϕ_I ЭМУ даже сравнительно небольших мощностей снабжаются дополнительными полюсами и компенсационными обмотками. Обычно $\phi_I = 1,5 \div 2$.

Степень форсировки по напряжению ϕ_U ограничивается насыщением магнитной цепи. Обычно $\phi_U = 1,5 \div 2$ и лишь в специальных ЭМУ достигает трех.

ЭМУ с независимым возбуждением

По своему устройству это специальный генератор постоянного тока с независимым возбуждением. Его отличие от обычных генераторов постоянного тока состоит в следующем.

1. С целью устранения влияния вихревых токов на переходные процессы, в которых работает ЭМУ, у него шихтуются не только сердечник якоря, но и станина и полюсы.

2. С целью повышения степени форсировки по напряжению и току, а также коэффициента усиления ЭМУ рассчитывается на значительно меньшие электромагнитные нагрузки: индукции и плотности тока.

3. С целью улучшения коммутации ЭМУ всегда снабжаются дополнительными полюсами (исключение составляют только ЭМУ очень малых мощностей). С этой же целью ЭМУ выполняются с увеличенным числом пазов и коллекторных пластин.

4. С целью уменьшения постоянной времени, а также улучшения коммутации ЭМУ, начиная с мощностей 500—600 Вт, снабжаются компенсационными обмотками.

5. Для обеспечения нормальной работы в схемах регулирования ЭМУ снабжается не одной, а несколькими обмотками возбуждения (управления).

Одноступенчатый ЭМУ с независимым возбуждением обычно имеет $k_y = 50 \div 100$.

В качестве ЭМУ может быть использован и обычный генератор постоянного тока с независимым возбуждением. Однако он будет иметь меньший коэффициент усиления $k_y = 10 \div 50$ и большую постоянную времени T . С целью увеличения k_y и уменьшения T в случае использования обычного генератора целесообразно уменьшить его выходное напряжение.

С целью уменьшения постоянной времени ЭМУ всех типов нередко последовательно с обмоткой управления включается дополнительный резистор с сопротивлением R_d , примерно равным сопротивлению обмотки управления R_y . Постоянная времени цепи управления, а следовательно, и всего ЭМУ при этом значительно уменьшается: $T \approx L/(R_y + R_d)$, однако одновременно с этим уменьшается и коэффициент усиления k_y .

Положительными свойствами одноступенчатого ЭМУ с независимым возбуждением являются его простота, надежность, невысокая стоимость. Недостатки — невысокий коэффициент усиления и сравнительно большая постоянная времени.

ЭМУ с самовозбуждением — это усовершенствованный ЭМУ с независимым возбуждением. У ЭМУ с самовозбуждением обмотка возбуждения создает не всю МДС, необходимую для возбуждения машины, а лишь меньшую часть ее. Основная часть МДС создается обмоткой самовозбуждения, мощность в которую поступает с выхода усилителя. Это способствует уменьшению мощности управления, а следовательно, увеличению коэффициента усиления в 8—10 раз.

Многоступенчатые одноякорные ЭМУ продольного поля применяют с целью увеличения коэффициента усиления и компактности электромашинных усилителей. Многоступенчатый одноякорный ЭМУ продольного поля имеет, как правило, четыре или больше полюсов и

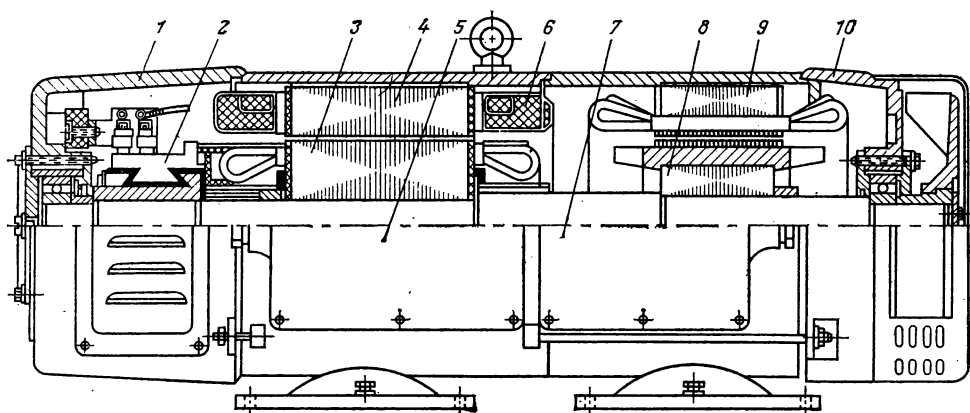


Рис. 26.29. Электромашинный усилитель типа ЭМУ-12А:

1 — передний подшипниковый щит; 2 — коллектор усилителя; 3 — якорь усилителя; 4 — статор усилителя; 5 — коробка выводов усилителя; 6 — компенсационная обмотка и обмотка добавочных полюсов; 7 — коробка выводов электродвигателя; 8 — ротор электродвигателя; 9 — статор электродвигателя; 10 — задний подшипниковый щит

из-за уменьшения тока I_q . В ЭМУ больших мощностей с целью улучшения коммутации под щетками $q-q$ кроме подмагничивающей обмотки в цепь якоря по поперечной оси включается еще обмотка дополнительных полюсов (рис. 26.27), устанавливаемых по поперечной оси.

Внешние характеристики ЭМУ (рис. 26.28) поперечного поля $U_d = f(I_d)$ при $I_y = \text{const}$, от которых во многом зависит коэффициент усиления, в основном определяются степенью компенсации потока $\Phi_{к.о.}$.

При недокомпенсации ($\Phi_{ад} > \Phi_{к.о.}$) выходное напряжение ЭМУ резко падает с ростом тока нагрузки I_d вследствие размагничивающего действия потока $\Phi_{ад}$ (см. рис. 26.26). При точной компенсации $\Phi_{ад} = \Phi_{к.о.}$ напряжение U_d с ростом тока I_d уменьшается незначительно — лишь за счет падения напряжения в цепи якоря $\Delta U_d = I_d(R_a + R_{к.о.} + R_{д.п.})$.

При перекомпенсации ($\Phi_{ад} < \Phi_{к.о.}$) напряжение U_d увеличивается с ростом тока I_d , что приводит к неустойчивой работе ЭМУ.

Нормально ЭМУ поперечного поля работают с небольшой недокомпенсацией, при этом они имеют большой коэффициент усиления и работают устойчиво. Коэффициент усиления ЭМУ поперечного поля очень высок: $k_y = 10\,000 \div 20\,000$, что объясняется наличием двух ступеней усиления.

Постоянная времени ЭМУ поперечного поля невелика. Она составляет десятки или сотни доли секунды и определяется в основном постоянной времени поперечной цепи якоря.

ЭМУ поперечного поля выпускаются как в СССР, так и за рубежом довольно в больших количествах. В СССР выпускается единая серия усилителей поперечного поля ЭМУА, которые выполняются в одном корпусе с приводным асинхронным двигателем (рис. 26.29). Основные технические данные усилителей серии ЭМУА представлены в табл. 26.13.

Кроме ЭМУ единой серии выпускается ряд других электромашинных усилителей. Иногда они выполняются в одном корпусе с двигателем постоянного тока.

26.3. ТАХОГЕНЕРАТОРЫ

Общие сведения

Тахогенераторами (ТГ) называются небольшие электрические машины, выходное напряжение которых U_r является практически линейной функцией частоты вращения n вала (рис. 26.30):

$$U_r = kn = k_1 d \alpha / dt.$$

В схемах автоматики ТГ используются для измерения частоты вращения, осуществления обратной связи по скорости в следящих системах, осуществления электрического дифференцирования, интегрирования и т. п.

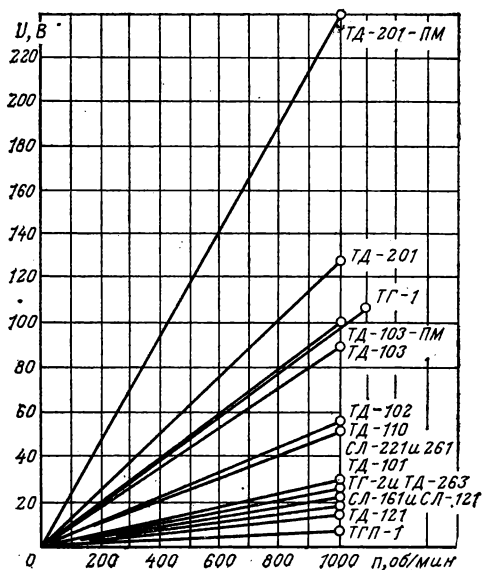


Рис. 26.30. Выходные характеристики тахогенератора различных типов

Таблица 26.13. Технические данные серии ЭМУ-А. электромашинных усилителей поперечного поля в однокорпусном исполнении на 3000 об/мин

Тип двигателя	Номинальные данные на выходе			Обмотки управления						Встроенный асинхронный двигатель								(в зависимости от исполнения)
				Входная мощность каждой обмотки при числе обмоток			Отношение дляately допустимого тока к номинальному при числе обмоток			Напряжение питания, В	I, А	P ном, кВт	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$		$\frac{I_{п}}{I_{ном}}$		cos φ	
	U _{вых} , В	P _{вых} , кВт	I _{вых} , А	2	3	4	2	3	4									
ЭМУ-3А	115	0,2	1,75	0,5	0,75	—	6	4	—	127/220 220/380	2,75/1,6 1,6/0,92	0,47	2,7	5,5	0,77	42	—	
ЭМУ-5А	115	0,5	4,85	0,5	0,75	—	6	4	—	127/220 220/380	5,5/3,2 3,2/1,83	0,94	1,7	7,0	0,77	53	111— 205	
ЭМУ-12А	115	1,2	10,4	0,5	0,75	1,0	9	7	4,5	127/220 220/380	10,9/6,3 6,3/3,63	1,97	2,7	7,0	0,82	61	128— 260	
ЭМУ-25А	115	2,5	21,7	0,6	0,9	1,2	9	7	4,5	127/220 220/380	24/13,8 13,8/8,0	4,2	2,7	7	0,8	60	115— 264	
	230	2,5	10,8	0,6	0,9	1,2	9	7	4,5	127/220 220/380	24/13,8 13,8/8	4,2	2,7	7	0,8	60	264	
ЭМУ-50А	230	4,5	19,6	0,65	1	1,3	9	7	4,5	127/220 220/380	37/21,5 21,5/12,4	6,6	2,7	8,5	0,81	68	125— 312	
	230	7	30,5	0,6	0,9	1,2	9	7	4,5	127/220 220/380	55,5/32 32/18,5	10	2,7	8	0,82	70	320— 410	
ЭМУ-100А	230	10	43,5	0,65	1	1,3	9	7	4,5	127/220 220/380	74/43 43/2,7	13,5	2,7	8,5	0,88	74	210— 438	

Примечания: 1. ЭМУ-А имеют: а) однокорпусное исполнение для всех мощностей; б) размагничивающие обмотки переменного тока; в) дополнительные обмотки возбуждения по поперечной оси.

2. Номинальный режим работы ЭМУ — продолжительный. Допускается работа усилителей в повторно-кратковременных режимах при условии сохранения норм превышения температуры над температурой окружающей среды и отсутствия заметного подгара коллектора и щеток.

3. Электромашинные усилители должны допускать: а) перегрузку по току по сравнению с номинальным током нагрузки в 2 раза в течение 5 с при номинальном напряжении; б) перегрузку по току в 3 раза при 50 % номинального напряжения 6 раз в течение часа; в) повышение напряжения на якоре усилителя на 30 % номинального напряжения в течение 5 мин; г) повышение напряжения до 1,75 номинального за счет форсировки тока управления при холостом ходе в течение 5 с.

Основными требованиями, которые предъявляются к ТГ, являются:

1) высокая линейность выходной характеристики;

2) большая крутизна выходной характеристики, мВ/(об/мин),

$$k = U_r/n;$$

3) симметрия выходного напряжения:

$$U_r(+n) = U_r(-n);$$

4) минимальное остаточное напряжение U_r при $n=0$ (у ТГ переменного тока) и минимальная зона нечувствительности (у ТГ постоянного тока);

5) минимальные пульсации выходного напряжения (у ТГ постоянного тока);

6) минимальное изменение фазы выходного напряжения (у ТГ переменного тока);

7) максимум выходной мощности при минимальной потребляемой мощности;

8) малый момент инерции ротора (якоря);

9) стабильность выходной характеристики при изменении условий окружающей среды.

В остальном требования, предъявляемые к ТГ, не отличаются от требований, предъявляемых к другим электромашинным элементам автоматики.

По роду тока ТГ делятся на ТГ переменного тока — синхронные и асинхронные и ТГ постоянного тока — с электромагнитным возбуждением и постоянными магнитами.

Синхронные тахогенераторы

Синхронные ТГ — это небольшие синхронные генераторы, возбуждаемые постоянными магнитами, расположенными на роторе. В пазах статора ТГ располагается трехфазная, двухфазная или однофазная обмотка. ЭДС, наводимая в обмотках статора, зависит от частоты вращения n , эффективного числа витков обмотки w , магнитного потока Φ и числа пар полюсов p :

$$E = 4,44 \frac{pn}{60} w \Phi.$$

При отсутствии нагрузки ($Z_n = \infty$; $I = 0$) ЭДС прямопропорциональна частоте вращения n .

Частота ЭДС f , Гц, переменна — пропорциональна частоте вращения ротора n :

$$f = \frac{pn}{60}.$$

При нагрузке, когда ток ТГ изменяется вместе с частотой вращения n , выходное напряжение ТГ обычно несколько отклоняется от линейного закона изменения вследствие уменьшения магнитного потока Φ из-за реакции якоря.

Положительным свойством синхронного ТГ является его большая выходная мощность.

К недостаткам синхронного ТГ следует отнести, во-первых, зависимость его выходного напряжения от характера нагрузки (при емкостной нагрузке напряжение имеет тенденцию

увеличения, при индуктивной — уменьшения). во-вторых, непостоянство частоты выходного напряжения. Последний недостаток, правда, в схемах дискретного действия становится положительным свойством ТГ.

Асинхронные тахогенераторы

Асинхронные ТГ по своей конструкции не отличаются от асинхронных исполнительных двигателей с полым немагнитным ротором (см. § 26.1, рис. 26.7). На их статоре также располагаются две обмотки, сдвинутые в пространстве на электрический угол 90° (рис. 26.31). Одна из обмоток — B подключается к сети и называется обмоткой возбуждения. С другой обмотки — Γ снимается выходное напряжение ТГ. Эта обмотка называется выходной или генераторной.

Принцип действия асинхронного ТГ состоит в следующем. Переменный ток возбуждения создает пульсирующий ток Φ_b , который, пронизывая полый ротор, наводит в нем ЭДС трансформации. Контуры токов ротора от ЭДС трансформации располагаются в плоскостях, перпендикулярных потоку возбуждения (рис. 26.31, а). Эти токи создают поток ротора Φ_{Rd} , который направлен навстречу потоку возбуждения и компенсируется возрастающим током обмотки возбуждения.

При вращении ротора его «волокна» пересекают поток возбуждения и в них кроме ЭДС трансформации наводятся еще ЭДС вращения. Под действием ЭДС вращения по ротору протекают токи, контуры которых совпадают с осью потока возбуждения Φ_b (рис. 26.31, б). Эти токи создают свой магнитный поток ротора Φ_{Rq} , который направлен по поперечной оси тахогенератора. Поток Φ_{Rq} сцепляется с витками генераторной обмотки Γ и наводит в ней ЭДС E_r — выходную ЭДС тахогенератора. Так как поток Φ_{Rq} изменяется с частотой сети, то частота выходной ЭДС равна частоте сети и не зависит от угловой скорости ротора.

ЭДС вращения $E_{вр}$, а следовательно, и поток Φ_{Rq} и выходная ЭДС E_r пропорциональны частоте вращения ротора:

$$E_r \sim \Phi_{Rq} \sim E_{вр} \sim n.$$

Выходное напряжение ТГ U_r может быть выражено следующим образом:

$$U_r = - \frac{jkU_b n_*}{A - B n_*^2},$$

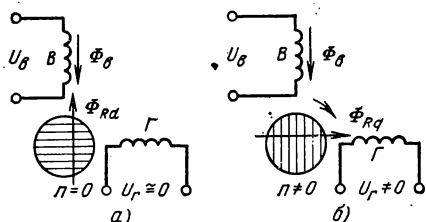
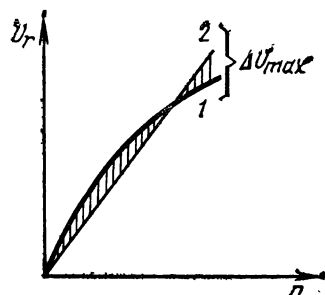


Рис. 26.31. К вопросу о принципе действия асинхронного тахогенератора:

а — контуры токов ротора, вызываемых ЭДС трансформации; б — контуры токов ротора, вызываемых ЭДС вращения

Рис. 26.32. Выходные характеристики асинхронного тахогенератора:

1 — реальная;
2 — идеальная



где $k = \omega_r / \omega_b$ — коэффициент трансформации, равный отношению эффективных чисел витков обмоток — генераторной и возбуждения; $n_* = n / n_c$ — относительная частота вращения ротора ТГ, равная отношению действительной частоты вращения n к синхронной n_c ; A и B — комплексные коэффициенты, зависящие от параметров ТГ — его активных и индуктивных сопротивлений.

Как видно из выражения U_r , оно не является линейной (рис. 26.32) функцией частоты вращения ротора n_* . Нелинейность появляется за счет члена $B n_*^2$. При проектировании тахогенераторов этот член стараются уменьшить. Последнее можно достичь за счет уменьшения B либо путем уменьшения n_* .

Для уменьшения относительной частоты вращения $n_* = n / n_c = p n / 60 f$ обычно ТГ проектируются с числом пар полюсов $p = 2$ (в ТГ с числом пар полюсов $p = 1$ на выходную характеристику оказывает большое влияние магнитная асимметрия ТГ) на повышенную частоту питания f (400, 500 Гц).

Коэффициент B равен

$$B = \frac{k^2}{Z_n} \frac{Z_{Sb}^2}{r_{Rb}} + \frac{Z_{Sb}}{r_{Rb}},$$

где Z_n — сопротивление нагрузки; Z_{Sb} — сопротивление обмотки возбуждения; r_{Rb} — активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке возбуждения.

Для уменьшения B стремятся работать при больших сопротивлениях нагрузки Z_n и ротор ТГ (с целью увеличения r_{Rb}) выполняют из материалов с большим удельным сопротивлением — фосфористой, марганцовистой бронзы или из сплавов типа манганина, нейзильбера.

Выходное напряжение асинхронного ТГ не является строго линейной функцией частоты вращения и, кроме того, при изменении частоты вращения изменяется по фазе. Поэтому качество асинхронных ТГ оценивается их амплитудной и фазовой погрешностями.

Амплитудную и фазовую погрешности ТГ можно значительно уменьшить путем подбора характера нагрузки — компаундирования ТГ. Амплитудную погрешность можно свести до минимума при определенной активно-емкостной нагрузке, а фазовую — при определенной активно-индуктивной нагрузке.

Теоретически напряжение на выходе ТГ при неподвижном роторе должно быть равно

Таблица 26.14. Основные технические данные асинхронных тахогенераторов

Тип тахогенератора	n, об/мин	f, Гц	Обмотка возбуждения			Генераторная обмотка		Отклонение от линейности, %	Габариты, мм			Масса, кг	Оптовая цена, руб.
			U, В	I, А	P, Вт	E, В	Нулевое напряжение, мВ		Длина	Ширина	Высота		
ТД-1	2400	50	110	0,15	6,5	19,2	25—50	1,5	115	110	118	3,0	—
ТД-2	2400	50	127	0,13	6,2	19,2	25—50	1,5	115	110	118	3,0	—
АТ-201	4000	500	110	0,22	11,0	30	25—50	0,1	128	90	100	2,5	—
АТ-231	4000	500	110	0,30	14,0	34	25—75	0,1	126	70	74	1,9	7
АТ-261	4000	400	110	0,20	11,0	30	25—100	0,15	114	70	74	1,8	38,3
ТГ-4	6000	400	110	0,30	14,0	10, крутизна 8,33 мВ·мин/об	25—50	2,5	117	60	80	1,5	41; 47,5 (в зависимости от исполнения)
ТГ-5А	9000	400	115	0,06	4,0	11 на 1000 об/мин	25—50	2,5	32	42	48	0,28	—

нулю. Однако практически вследствие неточного сдвига обмоток на электрический угол 90° , магнитной связи их за счет потоков рассеяния, не строго постоянного воздушного зазора, неравномерности ротора и других причин во всех ТГ имеет место нулевое (остаточное) напряжение, наличие которого весьма нежелательно.

Нулевое напряжение изменяется при повороте ротора. Его абсолютное значение у современных ТГ составляет 25—100 мВ, а переменная составляющая — 5—7 мВ.

С целью уменьшения нулевого напряжения улучшают технологию изготовления ТГ: одну из обмоток располагают на внутреннем, другую — на внешнем статоре, фиксируя внутренний статор в положении, соответствующем минимуму нулевого напряжения; применяются специальные компенсирующие обмотки, включаемые по различным схемам.

Крутизна выходного напряжения ТГ зависит от его коэффициента трансформации $k = \omega_r / \omega_n$, параметров обмоток и ротора. У современных ТГ она колеблется от 1 до 10 мВ/(об/мин). Наибольшую крутизну обычно имеют ТГ, обеспечивающие в схемах автоматики обратную связь по скорости.

Основные технические данные некоторых асинхронных ТГ, выпускаемых в СССР, представлены в табл. 26.14.

Тахогенераторы постоянного тока

Тахогенераторы постоянного тока — это машины постоянного тока малой мощности с независимым электромагнитным возбуждением или с постоянными магнитами, работающие в генераторном режиме (табл. 26.15).

ЭДС якоря ТГ при постоянном магнитном потоке пропорциональна частоте вращения:

$$E = c_E \Phi n.$$

При нагрузке ($I_n \neq 0$) в случае насыщенной магнитной цепи вследствие размагничивающего действия реакции якоря магнитный поток Φ ТГ несколько уменьшается с увеличением тока I_n при росте частоты вращения, что приводит к искривлению выходной характеристики (рис. 26.33). С целью устранения влияния реакции якоря на выходную характеристику ТГ желательно выполнять ненасыщен-

ми. Нелинейность выходной характеристики в современных ТГ постоянного тока достигает 0,5—3 %.

Наличие в выходной цепи ТГ щеточных контактов приводит к нестабильности выходной характеристики, к появлению зоны нечувствительности при малых угловых скоростях (рис. 26.33), к несимметрии выходной характеристики, заключающейся в неодинаковости показаний ТГ при вращении якоря в различных направлениях, к излучению радиопомех.

С целью устранения недостатков, вносимых щеточными контактами, их переходное сопротивление стараются свести к минимуму. С этой целью применяют медно-графитовые, серебряно-графитовые щетки, а в особо ответственных ТГ — даже серебряные или золотые контактные пары: коллектор — щетки. Однако даже в этих случаях полностью устранить недостатки, вносимые щеточными контактами не удается. В современных ТГ ошибка асимметрии составляет 1—3 %. С целью борьбы с радиопомехами ТГ снабжаются либо специальными экранами, либо фильтрами.

Большим недостатком ТГ постоянного тока является пульсация выходного напряжения. Причины пульсации самые различные. Все их можно разделить на якорные и коллекторные.

Якорные пульсации возникают из-за неравномерности воздушного зазора, неравенства магнитной проводимости якоря в различных радиальных направлениях. С целью их

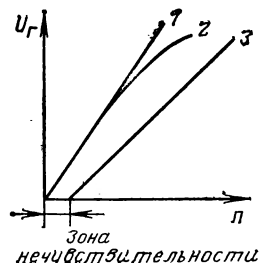


Рис. 26.33. Выходные характеристики тахогенератора постоянного тока:

1 — при $R_H = \infty$ и $R_{\text{ш}} = 0$; 2 — при $R_H \neq \infty$ и $R_{\text{ш}} = 0$ в насыщенном тахогенераторе; 3 — при $R_H \neq \infty$ и $R_{\text{ш}} \neq 0$ в ненасыщенном тахогенераторе

Т а б л и ц а 26.15. Основные технические данные тахогенераторов постоянного тока

Тип тахогенера- тора	n , об/мин	$E_{н.в.х.}$, В	$\frac{U_{в.в.х.}}{n}$, В/(об/с)	$\frac{P_{в.в.х.}}{n}$, Вт/(об/с)	I_A , А	Статический мо- мент сопротив- ления возбуж- денной машины, мН·м 10^{-1}	Статический мо- мент трения не- возбужденной ма- шины, мН·м 10^{-1}	J_A , г·см ²	U_B , В	I_B , А	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Масса, кг	Оптовая цена, руб.
СЛ-121	3500	—	1,1	0,0075	0,1	35	25	49	110	0,05	88,46	55	50	0,44	22,5
СЛ-161	3500	—	1,2	0,0085	0,1	38	25	52	110	0,05	103,6	55	50	0,49	26,4
СЛ-221	3700	—	1,5	0,013	0,2	70	30	137	110	0,05	104	74	70	0,90	—
СЛ-261	3600	—	1,5	0,044	0,2	70	35	195	110	0,08	115	74	70	1,25	—
ТД-101	1500	—	1,4	0,02	0,1	14,7	34,3	62	110	0,065	105,2	55	50	0,70	33,7
ТД-102	1500	—	3,3	0,028	0,1	14,7	34,3	62	110	0,065	105,2	55	50	0,70	34
ТД-103	1500	—	6,6	0,041	0,1	14,7	44,1	195	110	0,06	105,2	55	50	0,70	34
ТД-100	1000	—	7,7	0,077	0,2	80	20	235	110	0,1	—	—	—	—	—
ТД-201ПМ	1000	—	14,4	0,288	0,2	120	25	560	—	—	—	—	—	—	—
ТД-110	3000	—	3,0	—	0,15	—	—	68,5	—	—	102,5	55	50	—	—
ТД-121	4500	—	0,72	0,0045	0,037	—	—	—	6	—	88	55	50	—	—
ТД-253	3600	—	1,08	0,002	0,12	—	—	—	24	—	115	72	69,7	—	—
ТД-103ПМ	1000	—	6,0	0,051	0,1	70	20	195	—	—	—	—	—	—	—
ТГ-1	1100	110	0,42	—	0,01	300	120	—	27	—	133	89	85	1,85	30,6
ТГ-121	3500	50	1,27	—	0,02	250	100	—	27	0,3	104	74	70	0,785	—
ТГ-3	4000	—	1,0	—	0,1	250	100	—	27	0,3	110	50	46	0,50	—
ТГП-1	7000	—	0,42	—	0,1	50	20	—	—	—	66,5	33	32	0,15	—
МЭТ-8/55	1900	55	—	—	0,08	—	—	—	55	—	247	180	153	9	—
ЭТ4/110	1900	110	—	—	0,12	—	—	—	110	—	247	180	153	9	—
ЭТ7/110	1900	110	—	—	0,21	—	—	—	110	—	247	180	153	9	—
ТГ-041	3000	55	1,1	—	0,22	—	—	—	50	0,045	109	74	74	0,96	—
ТГ-04	3000	55	1,1	0,24	0,022	—	—	—	110	—	—	—	—	0,82	47,5
ТМГ-30	4000	460	6,9	0,45	0,065	—	—	—	—	—	134	117	115	42	17,2
ТМГ-30П	4000	230	3,45	0,3	0,087	—	—	—	110	—	134	117	115	42	17,9
ТМГ-30	4000	230	3,45	0,75	0,130	—	—	—	110	—	134	117	115	4,0	17,2
ДТ-100	800	100	7,5	—	—	—	—	—	—	—	220	140	140	—	—

Примечание. Тахогенераторы с буквой П в наименовании возбуждаются постоянными магнитами.

устранения увеличивают воздушный зазор, обрабатывают цилиндрические поверхности якоря, вала, подшипниковых щитов по высокому классу точности, применяют веерную сборку пакета стали якоря.

Зубцовые пульсации возникают вследствие пульсаций магнитной проводимости воздушного зазора из-за зубчатого строения якоря. С целью устранения зубцовых пульсаций делают скос пазов якоря, правильно выбирают полюсную дугу, число пазов якоря, применяют магнитные клинья и т. п.

Коллекторные пульсации возникают из-за вибрации щеток вследствие неровностей коллектора, периодического изменения числа секций якоря в параллельных ветвях, добавочных коммутационных токов, нагружающих контакт, и т. п. С целью устранения коллекторных пульсаций увеличивают число коллекторных пластин, надежность щеточного устройства, улучшают качество обработки коллектора и т. п.

Однако несмотря на все меры предосторожности, пульсации выходного напряжения в ТГ постоянного тока обычной конструкции полностью устранить не удается.

Желание свести до минимума пульсации выходного напряжения привело к созданию ТГ с полыми якорями, выполняемыми аналогично малоинерционному исполнительному двигателю постоянного тока с полым якорем (см. § 26.1).

У этих ТГ совершенно отсутствуют якорные и зубцовые пульсации, так как якорь не имеет зубцов и выполняется не из ферромагнитного материала. Зазор между полюсами и внутренним якорем здесь постоянный. Он большой, поэтому реакция якоря здесь весьма незначительна. Коммутация очень хорошая.

С целью устранения коллекторных пульсаций выбирается повышенное число коллекторных пластин. Все это обеспечивает хорошие характеристики ТГ.

Тахогенераторы с полым якорем пока серийно не выпускаются. Однако во многих схемах в качестве ТГ используются малоинерционные исполнительные двигатели постоянного тока с полыми немагнитными якорями (см. § 26.1).

26.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ В СХЕМАХ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ (СЕЛЬСИНЫ)

Общие сведения

Синхронной связью называется такая электрическая связь, которая обеспечивает одновременное вращение или одновременный поворот двух или нескольких механически несвязанных, находящихся на расстоянии друг от друга осей механизмов.

В технике получили распространение два основных вида систем синхронной связи: система «электрического вала» (синхронного вращения) и система «передачи угла» (синхронного поворота).

Системы «электрического вала» применяются там, где требуется осуществить синхронное вращение двух или нескольких находящихся на расстоянии друг от друга осей механизмов, имеющих значительные моменты сопротивления. Они осуществляются с помощью обычных электрических машин, чаще всего трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором. Обмотки роторов двигателей в этом случае соединяются друг с другом, обмотки

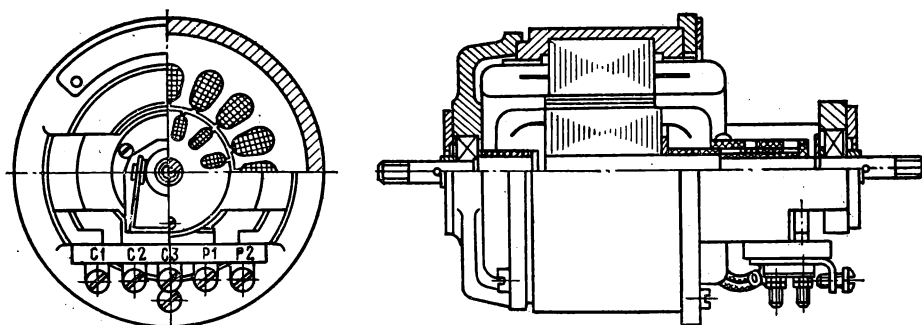


Рис. 26.34. Контактный сельсин

статоров питаются от одной и той же сети трехфазного тока.

Встречаются системы «электрического вала», осуществленные с помощью машин постоянного тока, однако распространение таких систем ограничено в связи с рядом их недостатков.

Системы синхронного поворота (передачи угла) применяются для целей дистанционного управления, регулирования или контроля. Чаще всего они осуществляются с помощью индукционных электрических машин — трехфазных или однофазных сельсинов.

Трехфазные сельсины конструктивно не отличаются от обычных асинхронных машин с фазным ротором. Простейшая трехфазная система синхронной связи представляет собой соединение двух одинаковых сельсинов — приемника и датчика. Сельсины включаются на сеть переменного тока своими первичными обмотками, концы соответствующих фаз вторичных обмоток сельсинов соединяются друг с другом. В зависимости от порядка следования фаз приемника и датчика сельсины вращаются в одном или разных направлениях.

Системы передачи угла, осуществляемые с помощью трехфазных сельсинов, не получили широкого распространения вследствие ряда их недостатков: неравенства синхронизирующих моментов при вращении по полю и против поля, малой устойчивости и необходимости трехпроводной (трехфазной) сети.

Наибольшее распространение в настоящее время получили системы «передачи угла», осуществляемые с помощью однофазных сельсинов. В зависимости от схемы соединения сельсинов и выполняемых ими функций различают два режима работы сельсинов — *индикаторный* и *трансформаторный*.

Однофазные сельсины по конструкции делятся на контактные и бесконтактные.

Однофазные контактные сельсины

Конструктивно однофазные контактные сельсины (рис. 26.34) напоминают синхронные машины. Они выполняются двухполюсными и имеют однофазную первичную обмотку — *обмотку возбуждения* и трехфазную вторичную обмотку — *обмотку синхронизации*. В сельсинах с явно выраженными полюсами обмотка возбуждения сосредоточенная (распо-

лагается на полюсах), в сельсинах с неявно выраженными полюсами — *распределенная* (размещается в пазах). Обмотка возбуждения располагается либо на статоре (сельсины с тремя контактными кольцами), либо на роторе (сельсины с двумя контактными кольцами), в соответствии с этим различное расположение имеет и обмотка синхронизации, которая всегда выполняется распределенной. Фазы обмотки синхронизации обычно соединяются в звезду. Для уменьшения переходного сопротивления контактные кольца и щетки обычно выполняются из сплавов серебра.

Основные технические данные некоторых типов контактных сельсинов-приемников представлены в табл. 26.16.

Бесконтактные сельсины

В настоящее время выпускаются бесконтактные сельсины двух видов: сельсины с внешним магнитопроводом, предложенные А. Г. Иосифьяном и Д. В. Свечарником (рис. 26.35, 26.36), и сельсины с кольцевым трансформатором (см. рис. 26.37).

Бесконтактные сельсины с внешним магнитопроводом (рис. 21.35, 21.36) имеют однофазную обмотку возбуждения и трехфазную обмотку синхронизации. Однофазная обмотка выполняется в виде двух кольцеобразных катушек 5, расположенных между статором 1 и тороидами 3. Катушки соединяются последовательно и согласно. Трехфазная обмотка синхронизации 6 располагается в пазах статора, который лишь незначительно отличается от статора обычного асинхронного двигателя. Фазы обмотки синхронизации соединяются в звезду.

Ротор 2 бесконтактного сельсина имеет два полюса, разделенных между собой немагнитным промежутком. Полюсы ротора набираются из листов электротехнической стали, которые располагаются в аксиальном направлении. Оба полюса ротора укрепляются на оси путем заливки сплавом алюминия, который является основным крепящим материалом ротора.

Тороиды 3 набираются из листов электротехнической стали. С внешней стороны к тороидам примыкают стержни внешнего магнитопровода 4, набранные из листов электро-

Таблица 26.16. Основные технические данные контактных сельсинов-приемников

Тип сельсина	U_B , В	f , Гц	I_B , А	P , Вт	Ω_{2max} , В	m , у, мН·м	M_c max, Н·м	$M_{тр}$, мН·м	$J_{рот}$, 10^{-3} кг·м ²	Масса, кг	Размеры, мм.				Оптовая цена, руб., Г кл./II кл.
											Длина с концом вала	Длина конца вала	Диаметр конца вала	Диаметр сельсина (посадочный)	
СС-405	110	50	0,13	7,5	51	—	—	30,5	980	0,8	119	14	4	62	15,6—14,2
НС-1404	110	50	0,33	11	49	10,0	550	14	128	0,85	119	13	4	62	46,2/42
НС-1501	110	50	0,75	15,0	55	50	2600	30	1600	3	150	13,5	5	100	90,2/82
СС-150	110	500	0,19	2,8	48	1,1	130	3,5	—	0,19	71,5	18,5	—	42	13,55
СС-454	220	500	0,315	11,0	62	3,0	160	8,0	—	0,8	11,9	14	4	62	16,5/15
СМС-1	115	400	—	—	90	6,0	800	—	—	0,54	—	—	—	—	—
СМСМ-1	115	400	0,08	1,5	58	—	45	—	—	0,15	62,5	10	3	36	—

Примечания: 1. Удельный и максимальный синхронизирующие моменты приведены для парной работы сельсинов-приемников от соответствующих по габаритам сельсинов-датчиков.
2. Сельсины СС-405 предназначены для работы в трансформаторном режиме.

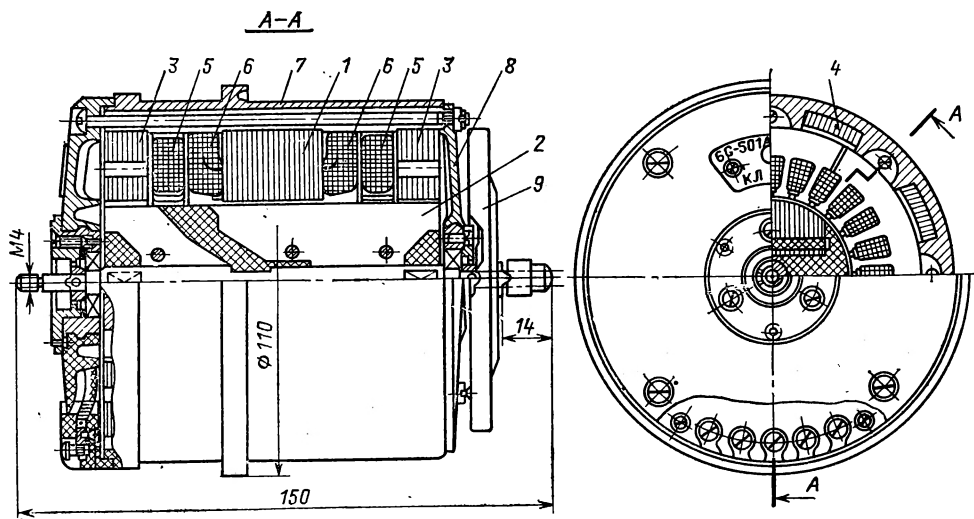


Рис. 26.35. Бесконтактный сельсин типа БС-501А

технической стали, в аксиальных пазах корпуса 7 (рис. 26.35), отлитого из сплава алюминия. В торцевой части с корпусом сочленяются подшипниковые щиты 8.

Магнитный поток бесконтактного сельсина создается (рис. 26.36) переменным током обмотки возбуждения 5. Замыкаясь вокруг катушек обмотки возбуждения 5, поток проходит по стержням внешнего магнитопровода 4, торондам 3, полюсам ротора 2. На пути между полюсами ротора поток встречает большое магнитное сопротивление в виде немагнитного промежутка. Это заставляет его изменить свое направление и пройти из одного полюса ротора в другой по зубцам и спинке статора 1, минуя немагнитный промежуток.

Проходя по статору, поток обмотки возбуждения сцепляется с фазами обмотки синхронизации 6. Величина этого потокосцепления зависит от положения ротора. При пово-

роте ротора потокосцепление изменяется. Таким образом, в бесконтактном сельсине выполняется условие, необходимое для работы любой электрической машины, — изменяющаяся магнитная связь двух обмоток. Однако в

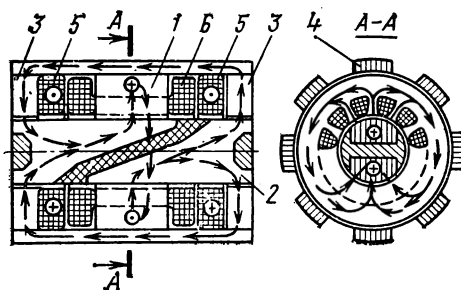


Рис. 26.36. Магнитная цепь бесконтактного сельсина при БС-501А

Таблица 26.17. Основные технические данные бесконтактных сельсинов-приемников

Тип сельсина	U_B , В	f , Гц	I_B , А	P , Вт	U_2 max, В	$m_{c,y}$, мН·м	m_c , max, мН·м	$M_{тр}$, мН·м	$J_{рот}$, 10^{-3} кг·м ²	Масса, кг	Размеры, мм				Оптовая цена, руб., 1 кл./11 кл.
											Длина с концом вала	Диаметр конца вала	Диаметр вала	Диаметр сельсина (посадочный)	
БС-1404	110	50	0,45	12,5	49	45	240	10	342	1,3	119	9	4	62	52,8/48
БС-1404Б	110	50	0,45	12,5	150	40	210	10	342	1,3	119	9	4	62	55/50
БС-404Н	110	400—500	0,4	23—19	100	60—40	400—280	10	342	1,3	119	9	4	62	—
БС-1405	110	50	0,08	2,0	36	—	—	15	133	1,25	119	9	4	62	58,3/53
БС-1405Б	110	50	0,09	2,0	81	—	—	15	133	1,25	119	9	4	62	59,4/54
БС-1500	127	50	0,50	20	55	170	800	18	885	2,30	86,5	13,5	4	100	107,8/98
БС-1501А	110	50	1,20	25	55	320	1800	30	1420	4,10	150	10	5	100	107,8/98
БС-1501Б	110	50	1,20	25	150	320	1800	30	1420	4,10	150	10	5	100	107,8/98
ДБС-500	127	50	0,5	20	55	170	800	18	885	4,40	161	17/10	4/8	130	—
ДБС-500Б	110	50	0,55	19	150	160	800	18	885	4,40	161	10/10	4/8	100	—
БС-151	110	400	0,3	7,5	100	11	60	1,5	—	—	104	26/50	4/8	100	—
БС-155	110	400	0,15	4,0	95	—	—	1,0	—	0,3	92	—	3	45	—
СБМ	36	400	0,1	—	80	—	—	1,0	—	0,065	48	—	2	27,5	—
БС-1	45	400	0,2	—	18	3	22	0,5	—	0,2	51,5	—	3	38	—
БС-2	36	400	0,05	—	10	—	—	0,5	—	0,2	51,5	—	3	38	—
БС-3	36	400	0,06	—	5	—	—	0,5	—	0,2	51,5	—	3	38	—
БС-4	45	400	0,35	—	28	—	—	0,5	—	0,275	64,5	—	3	41	—

Примечания: 1. Удельный и максимальный синхронизирующие моменты, приведенные в таблице, соответствуют работе сельсинов в схеме «один на один».

2. Срок службы СБМ 250 ч, БС-1 300 ч, остальных 3000 ч.

3. Синхронное следование обеспечивается при частоте вращения до 500 об/мин.

4. Сельсин ДБС-500 состоит из двух приемников, расположенных в одном корпусе. Вал одного сельсина проходит внутри несколько укороченного полюса вала другого сельсина.

5. Сельсины-приемники БС-405 и БС-405Б предназначены для работы только в трансформаторном режиме.

Таблица 26.18. Основные технические данные бесконтактных сельсинов-датчиков

Тип сельсина	U_B , В	f , Гц	I_B , А	P , Вт	U_2 max, В	J_2 рот, 10^{-3} кг/м	Масса, кг	$M_{тр}$, мН·м	N_m — максимальное число приемников, включаемых на один датчик	Размеры, мм				Оптовая цена, руб., 1 кл./11 кл.
										Длина конца вала	Длина с концом вала	Диаметр вала	Диаметр сельсина (посадочный)	
БД-160	110	400	0,4	10,0	103	—	0,42	15	—	10	106,5	3	45	—
БД-1404А	110	50	0,44	16,5	51,3	1,33	1,25	150	3 БС-1404 1 БС-405	13,2	119	4	62	51,7/47
БД-1404Б	110	50	0,46	15	150±8	1,33	1,2	150	—	13,2	119	4	62	53,9/49
БД-1500	127	50	0,5	20,5	55	8,85	1,20	200	2 БС-500 2 ДБС-500	—	—	—	—	—
БД-1501А	110	50/60	1,3/1,2	28/27	55/57	14,20	4,15	350	16 БС-1404 2 БС-1405 8 БС-1501	22,2	150	5	100	103,4/94
БД-1501Б	110	50	1,35	25,0	152±8	14,20	4,15	350	—	22,2	150	5	100	103/94

Примечания: 1. Допустимая частота вращения в схемах синхронной связи 500 об/мин.

2. Срок службы 3000 ч при средней частоте вращения 10 об/мин.

отличие от обычных электрических машин в бесконтактном сельсине обе обмотки располагаются неподвижно. Вращающаяся часть бесконтактного сельсина — его ротор — не несет на себе никаких обмоток. Отсутствие скользящих контактов значительно увеличивает надежность работы и стабильность характеристик бесконтактного сельсина по сравнению с контактными.

Для обеспечения устойчивости работы и уменьшения времени успокоения бесконтактные сельсины-приемники, предназначенные для работы в индикаторном режиме, снабжаются

фрикционными демпферами 9 (рис. 26.35). Основные технические данные рассмотренных выше бесконтактных сельсинов представлены в табл. 26.17 и 26.18.

В схемах синхронной связи бесконтактные сельсины работают точно так же, как и контактные.

Бесконтактные сельсины с кольцевым трансформатором (рис. 26.37) по конструкции отличаются от контактных сельсинов с обмоткой возбуждения на роторе лишь тем, что кольца и щетки, через посредство которых питается обмотка возбуждения контактного сель-

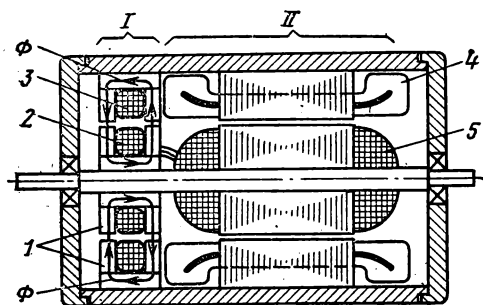


Рис. 26.37. Конструктивная схема бесконтактного сельсина с кольцевым трансформатором:

1 — магнитная цепь трансформатора; 2 — обмотка ротора трансформатора; 3 — неподвижная первичная обмотка трансформатора; 4 — обмотка синхронизации сельсина; 5 — вращающаяся обмотка возбуждения сельсина

сина, у бесконтактного сельсина заменены кольцевым трансформатором 1, который выполнен в одном корпусе с сельсином 11.

Первичная обмотка 3 трансформатора располагается на статоре, вторичная 2 — на роторе. Напряжение на вторичной обмотке наводится магнитным потоком Φ трансформатора, создаваемым током его первичной обмотки. Напряжение со вторичной обмотки трансформатора подается на обмотку возбуждения 5 сельсина.

Бесконтактные сельсины с кольцевым трансформатором обычно рассчитываются на работу от сетей повышенной частоты.

Работа сельсинов в индикаторном режиме

Простейшая индикаторная схема синхронной связи для дистанционной «передачи угла» состоит из двух одинаковых сельсинов (приемника и датчика) и линии связи (рис. 26.38). Обмотки возбуждения обоих сельсинов подсключаются к однофазной сети переменного тока. Концы фаз обмотки синхронизации приемника соединяются с концами фаз обмотки синхронизации датчика.

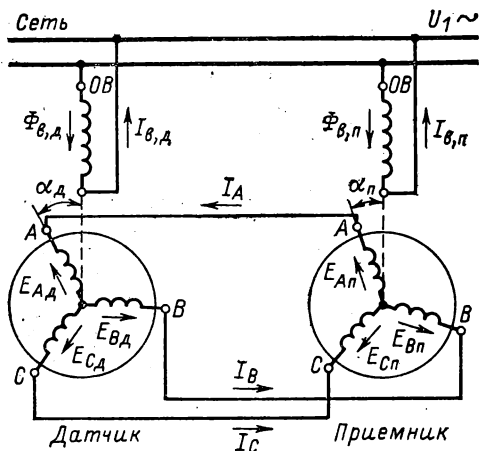


Рис. 26.38. Индикаторная схема синхронной связи

Переменный ток, проходящий по обмоткам возбуждения сельсинов, создает магнитный поток, который индуцирует ЭДС в обмотках синхронизации сельсинов. ЭДС той или иной фазы зависит от ее положения относительно обмотки возбуждения.

Если фазы обмоток синхронизации датчика и приемника расположены одинаково относительно соответствующих обмоток возбуждения, то в соединенных между собой линиях связи фаз обмоток синхронизации приемника и датчика индуцируются одинаковые ЭДС. Эти ЭДС, направленные встречно, уравновешивают друг друга, и в обмотках синхронизации сельсинов и линии связи токи отсутствуют. Такое положение роторов сельсинов называется согласованным.

Если ротор датчика поворотом на некоторый угол вывести из согласованного положения, то равновесие ЭДС, индуцированных в фазах обмоток синхронизации приемника и датчика, нарушится. По обмоткам синхронизации и линии связи потечет ток. В результате взаимодействия тока обмотки синхронизации с потоком обмотки возбуждения сельсина-приемника возникает вращающий (синхронизирующий) момент, который будет поворачивать ротор приемника до тех пор, пока он не придет в согласованное с заторможенным ротором датчика положение. Синхронизирующий момент, развиваемый сельсином-приемником, зависит от угла рассогласования (рис. 26.39) и параметров сельсинов, входящих в систему.

На практике очень часто применяются более сложные системы синхронной связи, в которых к одному сельсину-датчику подключается N (до 30 и более) сельсинов-приемников. Для получения необходимого синхронизирующего момента в таких схемах датчик обычно выбирается большей мощности, чем мощность каждого из приемников.

Основным требованием, которое предъявляется к сельсинам, работающим в индикаторном режиме, является точность передачи заданного датчиком угла, которую определяют ряд факторов: 1) удельный синхронизирующий момент — момент, приходящийся на 1° угла рассогласования; 2) момент трения и момент сопротивления на валу приемника; 3) коэффициент добротности — отношение удельного синхронизирующего момента к моменту трения; 4) сопротивление линии связи; 5) магнитная и электрическая асимметрия; 6) количество приемников, работающих от одного датчика; 7) небаланс ротора приемника; 8) время успокоения — время, в течение которого успо-

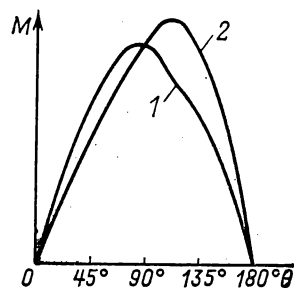


Рис. 26.39. Кривые синхронизирующих моментов:

1 — явнополюсного сельсина; 2 — неявнополюсного сельсина

каивается (устанавливается) ротор приемника после рассогласования на угол 179° .

Удельный синхронизирующий момент $M_{с.у}$ зависит от параметров сельсинов, работающих в схеме, сопротивления линии связи и количество приемников, работающих от одного датчика.

Удельный синхронизирующий момент каждого из N сельсинов-приемников, работающих от одного датчика (аналогичного приемникам), меньше, чем при работе этих сельсинов в схеме «один на один»: $M_{с.у} = M_{с.у1} \cdot 2/(N+1)$, где N — количество приемников, работающих от одного датчика.

Работа сельсинов в трансформаторном режиме

На обмотку возбуждения сельсина-датчика, работающего в трансформаторном режиме, подается напряжение от сети переменного тока постоянной частоты. Фазы обмотки синхронизации приемника и датчика соединяются линией связи (рис. 26.40). В отличие от индикаторного режима в трансформаторном режиме обмотка возбуждения приемника не питается от сети переменного тока. Напряжение $U_{вых}$ с ее выводов (выходное напряжение сельсина-приемника) подается на усилитель следящей системы).

Однофазный переменный ток, проходя по обмотке возбуждения сельсина-датчика, создает пульсирующий магнитный поток, который, сцепляясь с обмоткой синхронизации датчика, индуцирует в ее фазах ЭДС E_{Ad} , E_{Bd} , E_{Cd} . Так как фазы обмотки синхронизации датчика соединены линией связи с соответствующими фазами обмотки синхронизации приемника, то по последним протекают токи I_A , I_B , I_C . Эти токи создают пульсирующие магнитные потоки (Φ_{Ap} , Φ_{Bp} , Φ_{Cp}) приемника, которые, суммируясь, индуцируют в однофазной (выходной) обмотке возбуждения приемника ЭДС — выходное напряжение $U_{вых}$ приемника (рис. 26.40), величина которого зависит от взаимного расположения фаз обмоток синхронизации датчика и приемника по отношению к соответствующим однофазным обмоткам сель-

синов. Если поворачивать ротор датчика при заторможенном роторе приемника, то ЭДС ($U_{вых}$) обмотки возбуждения приемника будет изменяться примерно по синусоидальному закону.

В трансформаторном режиме сельсин-приемник поворачивается на заданный датчиком угол не самостоятельно, а с помощью вспомогательного двигателя, на обмотку управления которого через усилитель подается выходное напряжение $U_{вых}$ сельсина-приемника.

Согласованным положением сельсинов в трансформаторном режиме называется положение, при котором напряжение на выходе сельсина-приемника $U_{вых}$ минимально или равно нулю. В согласованном положении сельсинов в трансформаторной схеме синхронной связи соединенные между собой фазы обмоток синхронизации датчика и приемника в отличие от согласованного положения сельсинов в индикаторном режиме не занимают одинакового положения по отношению к соответствующим однофазным обмоткам.

Сельсины в трансформаторном режиме широко применяются в схеме дистанционного управления следящими приводами.

Качество работы сельсинов в трансформаторном режиме определяется:

- 1) остаточным напряжением (так называется выходное напряжение сельсина-приемника, в согласованном с сельсином-датчиком положении);
- 2) удельным выходным напряжением — напряжением, приходящимся на 1° угла рассогласования;
- 3) удельной выходной мощностью — мощностью, приходящейся на 1° угла рассогласования;
- 4) асимметрией магнитной и электрической систем;
- 5) точностью;
- 6) сопротивлением линии связи;
- 7) количеством приемников, работающих от одного источника.

Схема синхронной связи с дифференциальными сельсинами

Дифференциальные сельсины (рис. 26.41) по конструкции не отличаются от трехфазных: на их статоре и роторе располагаются трехфазные обмотки. В схемах синхронной связи они используются либо как промежуточные (вторые) датчики, либо как приемники, работающие от двух датчиков.

Рассмотрим работу дифференциального сельсина (ДС) в качестве второго (промежуточного) датчика. Поток обмотки возбуждения $\Phi_{в.д}$ сельсина-датчика (рис. 26.41) наводит ЭДС в фазах его обмотки синхронизации. Под действием этих ЭДС по фазам обмотки синхронизации датчика и фазам первичной (статорной) обмотки дифференциального сельсина текут токи, которые создают магнитные потоки фаз статора ДС $\Phi_{д.с}$ наводит ЭДС в фазах его вторичной (роторной) обмотки. Если фазы вторичной обмотки ДС занимают по отношению к пульсирующему потоку $\Phi_{д.с}$ его статора такое же положение, что и фазы обмотки синхронизации сельсина-прием-

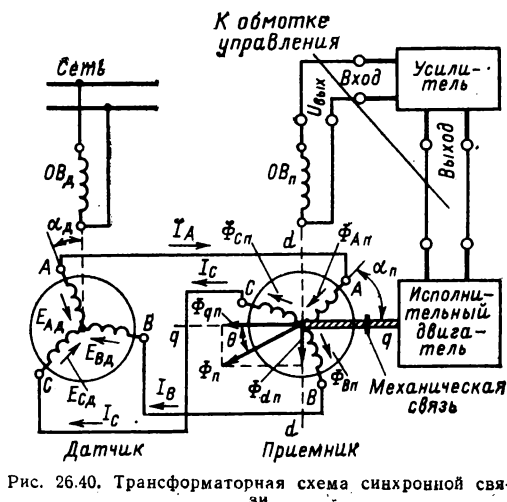


Рис. 26.40. Трансформаторная схема синхронной связи

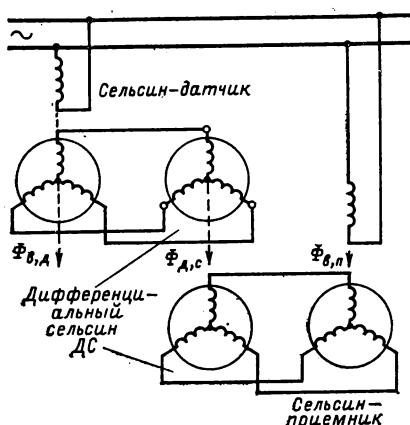


Рис. 26.41. Схема синхронной связи с дифференциальным сельсином

ника по отношению к потоку $\Phi_{в,д}$ обмотки возбуждения сельсина-приемника, то в цепи вторичная обмотка ДС — обмотка синхронизации сельсина-приемника ток отсутствует. Сельсины находятся в согласованном положении. Пару машин ДС — сельсин-приемник можно рассматривать как обычную пару сельсинов в индикаторном режиме с потоком возбуждения датчика (ДС) $\Phi_{д,с}$.

Если ротор ДС повернуть в какую-либо сторону на угол $\pm \alpha_{д,с}$, то, как и во всякой индикаторной системе, ротор сельсина-приемника повернется на такой же угол.

Если повернуть на некоторый угол α_d ротор сельсина-датчика, то на такой же угол повернется магнитный поток $\Phi_{д,с}$ обмотки статора дифференциального сельсина. Последнее равносильно повороту ротора ДС на угол α_d в противоположную сторону.

Таким образом, ротор сельсина-приемника будет реагировать как на поворот ротора

сельсина-датчика, так и на поворот ротора дифференциального сельсина. Угол поворота ротора сельсина-приемника будет равен сумме или разности углов α_d и $\alpha_{д,с}$:

$$\alpha_{\Pi} = \alpha_d \pm \alpha_{д,с}.$$

В табл. 26.19 представлены технические данные некоторых типов дифференциальных сельсинов.

Магнесины

В тех случаях, когда датчик и приемник находятся на небольшом расстоянии друг от друга, индикаторные системы синхронной связи часто осуществляются с помощью бесконтактных магнитоэлектрических машин, получивших название магнесинов.

Магнесин (рис. 26.42) состоит из торондального статора без пазов, набранного из листов электротехнической стали, на котором располагается кольцевая однофазная обмотка, питающаяся от сети переменного тока. Обмотка имеет две отпайки. Углы между отпайками, а также между каждой из отпайек и концами обмотки равны 120° . Ротор магнесина представляет собой цилиндрический двухполюсный постоянный магнит.

В магнесине имеется два магнитных потока. Один из них Φ_1 создается переменным током однофазной обмотки, поступающим из сети. Он замыкается по тороиду статора и изменяется с частотой сети f_1 . Другой поток — Φ_2 — создается постоянным магнитным ротором и замыкается по ротору и тороиду как в обычной двухполюсной машине.

При питании обмотки статора переменным током статор то насыщается — когда поток Φ_1 максимален, то остается ненасыщенным — когда поток Φ_1 мал или равен нулю. За один период изменения потока Φ_1 тороид статора

Таблица 26.19. Основные технические данные дифференциальных сельсинов

Тип сельсина	$U_B, В$	$f, Гц$	$U_2, В$	$m_c, ут\alpha x', Н \cdot м$	Момент трения возбужденного сельсина, $мН \cdot м$	$J_{рот}, 10^{-3} кг \cdot м^2$	Масса, кг	Размеры, мм				Оптовая цена, руб., 1 кл./11 кл.
								Длина с концом вала	Длина выступающего конца вала	Диаметр вала	Диаметр сельсина (посадочный)	
ДИД-1101	50	50	49	—	0,1	—	0,85	119	13	4	62	55/50
ДИД-505	57	50	68	—	0,5	15,20	2,65	150	15	5	100	23,2/21,2
НЭД-110	50	50	50	3	0,55	2,16	0,85	119	13	4	62	55/50
НЭД-1101Б	150	50	—	2,5	0,75	2,16	0,80	119	13	4	62	51,7/47
НЭД-1501	57	50	57	25	2,2	19,20	3,00	150	14,5	5	100	92,4/84
НЭД-501Б	150	50	—	12,5	2,2	—	2,80	150	15	5	100	26,85/24,4
СДС-1	90	400	90	—	—	—	2,22	160,5	21,5	6,5	85	—
СДСМ-1	58	400	58	—	—	—	0,20	66	10	3	36	—
ЭД-101	50	50	38	1,6	0,75	1,08	0,80	119	14	4	62	—
ЭД-501	57	50	—	12,5	5,0	15,30	2,65	150	15	5	100	—
ЭД-501Б	39	50	35,5	7,5	—	—	2,65	150	15	5	100	—
НЭД-101П	100	400	—	6,5	3,0	12	0,88	119	14,5	4	62	49,5/45
ДИД-204	100	400	98	—	1,4	20	0,46	109,5	—	—	45	47,3/43

Примечания: 1. Частота вращения, обеспечивающая синхронное следование, для дифференциальных сельсинов типа СДС-1 равна 300 об/мин, для сельсинов остальных типов — 500 об/мин.

2. Срок службы (при средней эксплуатационной частоте вращения 10 об/мин) сельсинов СДСМ-1 равен 200 ч, сельсинов СДС-1 — 400 ч и сельсинов НЭД-101Б и НЭД-501Б — 300 ч. Срок службы сельсинов остальных типов 1500 ч.

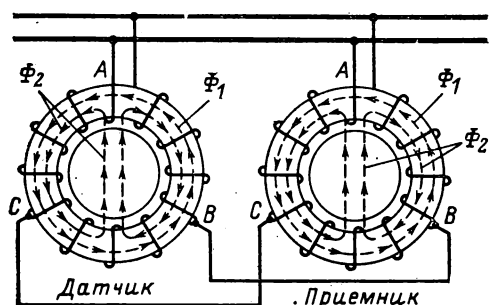


Рис. 26.42. Система синхронной связи на магнесинах

дважды насыщается (при $\Phi_1 = \Phi_{1m}$ и $\Phi_1 = -\Phi_{1m}$) и дважды становится ненасыщенным (при $\Phi_1 \approx 0$).

Таким образом, магнитное сопротивление тороида статора изменяется во времени с частотой f_2 , равной удвоенной частоте сети $2f_1$.

Величина потока Φ_2 постоянного магнита определяется МДС постоянного магнита $F_{п,м}$ и магнитным сопротивлением R_m на пути потока $\Phi_2 = F_{п,м}/R_m$.

Изменение магнитного сопротивления тороида R_m приводит к изменению с такой же частотой магнитного потока Φ_2 . Таким образом, поток Φ_2 постоянного магнита пульсирует с частотой $f_2 = 2f_1$.

Поток Φ_2 наводит в фазах обмотки статора, за которые можно принять части обмотки статора AB, BC, CA, ЭДС, зависящие от положения ротора.

Магнесины по способу синхронизации аналогичны двухполюсным сельсинам, фазы обмотки синхронизации которых соединены в треугольник.

По проводам линии связи, в качестве одного из которых в системе с магнесинами используется сеть, при рассогласовании магнесинов протекают токи двойной частоты $f_2 = 2f_1$. Эти токи, взаимодействуя с потоками Φ_2 магнесинов, создают синхронизирующий момент, необходимый для работы системы синхронной связи.

Токи, поступающие от источника питания и изменяющиеся с частотой f_1 , в проводах линии связи отсутствуют, так как одноименные отпайки обмоток и концы обмоток по отношению к напряжению сети являются равнопотенциальными точками.

Магнесин, как и сельсин, обладает свойствами самосинхронизации в пределах одного оборота.

Несмотря на сравнительно малый синхронизирующий момент магнесины вследствие их бесконтактности, а также малых габаритов и массы используются в ряде схем. Их погрешность обычно не превышает $1-2,5^\circ$.

26.5. ВРАЩАЮЩИЕСЯ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Вращающиеся трансформаторы (ВТ) — небольшие индукционные электрические машины, предназначенные для работы в схемах автоматики и вычислительной техники, где они служат для получения выходного напряжения

в виде вполне определенной функции от угла поворота ротора.

По конструкции обычный ВТ аналогичен двухфазному асинхронному двигателю с фазным ротором. Статор и ротор ВТ набираются из листов электротехнической стали. В пазах статора и ротора укладываются по две взаимно перпендикулярные обмотки.

Основным свойством ВТ является то, что взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора при вращении (повороте) ротора изменяется с большой степенью точности по закону синуса или косинуса.

В зависимости от схемы соединения обмоток и функций, выполняемых вращающимися трансформаторами, они делятся на синусно-косинусные (СКВТ), линейные (ЛВТ), масштабные (МВТ), ВТ-построители.

В синусно-косинусном ВТ (рис. 26.43) питание подводится к одной из обмоток статора S. Другая (квадратурная) обмотка статора K обычно замыкается накоротко или на некоторое сопротивление $Z_{кв}$. ЭДС, наводимые пульсирующим магнитным потоком статорной обмотки в обмотках ротора, изменяются при вращении ротора по закону синуса или косинуса в зависимости от первоначального положения ротора.

При несимметричной нагрузке ВТ ($Z_{Ан} \neq Z_{Вн}$) вследствие поперечной составляющей потока вторичных обмоток кривая зависимости выходного напряжения от угла поворота ротора отличается от синусоиды (косинусоиды):

$$E_A = \frac{k_1 \sin \alpha}{1 - k_2 \cos^2 \alpha},$$

где k_1 ; k_2 — постоянные коэффициенты.

Разность между фактическим и теоретическим углами поворота ротора, при которой получается то или иное выходное напряжение СКВТ, определяет его погрешность.

Погрешность СКВТ сводится к минимуму путем вторичного или первичного симметрирования. Условием вторичного симметрирования СКВТ при условии равенства собственных сопротивлений вторичных обмоток $Z_A = Z_B$ (что обычно выполняется) является равенство сопротивлений нагрузки вторичных обмоток $Z_{Ан} = Z_{Вн}$ (рис. 26.43).

Условием первичного симметрирования СКВТ при условии равенства собственных сопротивлений обмоток статора $Z_S = Z_K$ (что обычно имеет место) является равенство сопротивлений $Z_{кв}$, включенного в цепь квадрату-

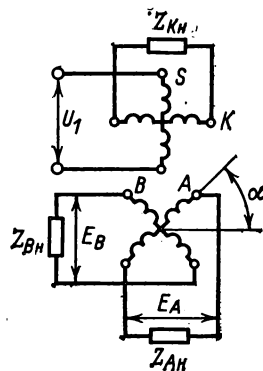


Рис. 26.43. Электрическая схема синусно-косинусного вращающегося трансформатора

Продолжение табл. 26.20

Тип ИБ.713	Габарит	$U_{в}, В$	Коэффициент трансформации	Сопротивление холостого хода при 500 Гц	Угол поворота	Материал магнитопровода	Тип конструкции
229	2	110	0,565	440	Ограниченный	Трансформаторная сталь	II
254				480			
255		110 или 220	0,95	1000	Неограниченный	Пермаллой	III
557	3	110	0,565	800		Трансформаторная сталь	II
558		60	0,1	850		Пермаллой	
597		110	0,575	800	Ограниченный	Трансформаторная сталь	III
598		60		850		Пермаллой	

Примечания: 1. Посадочный диаметр, мм
Наибольшая длина, мм

Габарит 1
Габарит 2
Габарит 3

IV — машины на шарикоподшипниках с контактными кольцами.
3. Класс точности в зависимости от погрешности на нулевых точках (0; 90; 180; 270°):
Класс точности 0 1 2 3
Допустимая погрешность, мин 3 8 16 22
4. Допустимое отклонение от номинального напряжения $\pm 5\%$.

2. I — машина на шарикоподшипниках с пружинными коллекторами;
II — машина на скользящих подшипниках с контактными кольцами;
III — машина на скользящих подшипниках с пружинными коллекторами;

Таблица 26.21. Основные технические характеристики линейных вращающихся трансформаторов типа ЛВТ. Коэффициент трансформации 0,565. Частота 427—500 Гц. Угол поворота — ограниченный

Тип ИБ.713	Габарит	$U_{в}, В$	Сопротивление холостого хода (при частоте 500 Гц), Ом	Тип конструкции
013 014	1	110 или 220 110	600 230	I
032 012	2 1	110 или 220	950	III I
277	2	110	100	III

Примечания: 1. В габарите 1 посадочный диаметр 90 мм, наибольшая длина 169 мм; в габарите 2 посадочный диаметр 70 мм, наибольшая длина 145 мм.
2. I — машины на шарикоподшипниках с пружинным коллектором;
III — машины на скользящих подшипниках с пружинным коллектором. Класс точности

в зависимости от погрешности в отображении линейной зависимости в пределах изменения угла поворота ротора $\pm 60^\circ$.
Класс точности: 1; 2. Допустимая ошибка, мин, 4'; 8' соответственно.
3. Материал магнитопровода — трансформаторная сталь.

Кроме обычных и плоских ВТ в настоящее время для систем точного отсчета и синхронно-следящих систем с малым углом поворота применяются дисковые приемники и датчики высокой точности — индуктосины.

Индуктосин (рис. 26.46, б) состоит из плоских статора и ротора, которые представляют собой обычно диски из изоляционного

материала с многополюсной печатной обмоткой. Ротор имеет однофазную, статор — двухфазную обмотку.

Для тех же целей, что и индуктосины, применяются редуктосины.

Редуктосин (рис. 26.46, в) состоит из шихтованных статора и ротора с открытыми пазами ($Z_R/Z_S=0,75$). В пазах статора укладываются

ются три однофазные обмотки: одна первичная (1) и две вторичные (2 и 2').

При питании первичной обмотки переменным током во вторичных обмотках наводятся ЭДС, амплитуда которых при повороте ротора изменяется по синусоидальному или косинусоидальному закону за счет изменяющегося потока сцепления с первичной обмоткой.

В табл. 26.20, 26.21 представлены технические данные некоторых вращающихся трансформаторов.

Список литературы

26.1. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Высшая школа, 1976. 416 с.

26.2. Хрушев В. В. Электрические микромашины автоматических устройств. Л.: Энергия, 1976. 384 с.

26.3. Микроэлектродвигатели для систем автоматики/В. В. Аненков, И. И. Васильченко, И. В. Булин-Соколов и др.; под редакцией Э. А. Лодочникова и Ф. М. Юферова. М.: Энергия, 1969. 272 с.

26.4. Осин И. Л., Колесников В. Н., Юферов Ф. М. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1976. 232 с.

26.5. Тун А. Я. Системы контроля скорости электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1984. 168 с.

26.6. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока/Н. П. Адволонкин, В. Т. Гращенко, Н. И. Лебедев, И. Е. Овчинников, А. К. Стыцина. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.

26.7. Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. М.: Высшая школа, 1980. 360 с.

Раздел 27

КОММУТАЦИОННАЯ И ЗАЩИТНАЯ АППАРАТУРА ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

27.1. Общие сведения по выключателям	441	27.5. Выключатели переменного тока, выпускаемые в СССР	472
Определения (441). Масляные выключатели (443). Воздушные выключатели (449). Элегазовые выключатели (453). Электромагнитные выключатели (). Вакуумные выключатели ().		Масляные выключатели (472). Выключатели нагрузки (476). Воздушные выключатели (478). Электромагнитные выключатели (479). Вакуумные выключатели (482)	
27.2. Расчет элементов выключателей	450	27.6. Приводы к выключателям переменного тока высокого напряжения	482
Расчет токоведущей цепи (459). Расчет и выбор контактов (459). Расчет электродинамических сил (462). Расчет траверсы (463). Расчет прочности изоляторов вводов (464). Элементы расчета воздушных выключателей (464). Элементы расчета масляных выключателей (465).		Электромагнитные приводы (482). Пружинные приводы (483). Пневматические приводы (483). Пневмогидравлические приводы (484).	
27.3. Восстановление напряжения на выключателе	465	27.7. Параметры приводов, выпускаемых в СССР	484
Основные обозначения (465). Восстанавливаемое напряжение для схем с сосредоточенными и распределенными параметрами (466). Расчет постоянных и упрощение схемы замещения (468). Методика определения эквивалентных емкостей при переходе от схемы с распределенными параметрами к схеме с сосредоточенными параметрами (468). Нормирование параметров восстанавливающегося напряжения (470)		27.8. Разъединители, короткозамыкатели и отделители	486
27.4. Назначение и выбор шунтирующих элементов	471	Общие сведения по разъединителям (486). Разъединители внутренней установки (487). Разъединители наружной установки (489). Короткозамыкатели и отделители (491). Приводы к разъединителям (492).	
		27.9. Предохранители высокого напряжения	493
		27.10. Разрядники и ограничители перенапряжений	496
		Список литературы	498

27.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМ

Определения

1. Номинальный ток $I_{ном}$ — наибольший ток (действующее значение), который аппарат способен длительно проводить при заданном номинальном напряжении, номинальной частоте и номинальной температуре воздуха, при этом температура частей аппарата не должна

превышать допускаемую, установленную для длительной работы (табл. 27.1).

2. Номинальное напряжение $U_{ном}$ — линейное напряжение трехфазной системы, в которой аппарат предназначен работать. Если выключатель может использоваться для различных классов напряжения, то за номинальное принимается наибольшее номинальное напряжение. Для компенсации падения напряжения на источниках энергии (генераторах, трансформаторах) напряжение поднимается на

Таблица 27.1. Номинальные напряжения, токи и мощности отключения выключателей различных типов

Род дугогасящей среды	Способ гашения дуги	Тип дугогасящего устройства	Тип выключателя	$U_{\text{ном}}$, кВ, не более	$I_{\text{ном}}$, А, не более	I_0 , ном. кА, не более	$P_{0, \text{ном}}$, мВ·А, не более
Масло	В простом разрыве	Отсутствует	Масляные баковые выключатели	10	1500	8,7	150
	В продольных или поперечных потоках продуктов разложения масла	Камеры с поперечным или продольным автодутьем	Масляные баковые с камерами	330	2000	40	25 000
			Маломасляные	500	2000	20	17 000
			Масляные горшковые	20	6000	100	3500
Твердое газогенерирующее вещество	Продольное или поперечное дутье продуктов разложения твердых газогенерирующих веществ	Камеры с поперечным или продольным автодутьем	Автогазовые выключатели	10	600	17	300
Сжатый воздух	В продольном или поперечном потоке сжатого воздуха	Камеры продольного и поперечного дутья	Воздушные (газонапорные)	750—1150	4000	63—40	80 000
Воздух и охлаждающие поверхности	Перемещение створа дуги магнитным полем и охлаждение в узких щелях камер	Лабиринтно-щелевые камеры	Электромагнитные	15	2000	29	750
		Камера с керамическими перегородками		15	2000	38	1000
Шестифтористая сера — элегаз	Охлаждение дуги в потоке элегаза	Камеры продольного или поперечного дутья	Элегазовые	750	4000	40	50 000
Вакуум (остаточное давление 10^{-7} — 10^{-10} Па)	В простом разрыве	Вакуумные дугогасительные устройства	Вакуумные выключатели	160	3200	40	17 000

5—15 % относительно номинального значения. Каждый класс напряжения имеет свое наибольшее рабочее напряжение $U_{н,р}$:

$U_{\text{ном}}$, кВ	$U_{н,р}$, кВ	$U_{\text{ном}}$, кВ	$U_{н,р}$, кВ
6	7,2	110	126
10	12	220	172
15	17,5	330	363
20	24	500	525
35	40,5	750	787

3. Номинальный ток отключения $I_{0, \text{ном}}$ — наибольший ток короткого замыкания (действующее значение периодической составляющей), который выключатель способен отключить при напряжении, равном наибольшему рабочему напряжению при заданных условиях восстановления напряжения и заданном цикле операций.

Ток отключения состоит из периодической и апериодической составляющих и меняется по действующему значению. Номинальный ток отключения определяется действующим значением периодической составляющей в момент расхождения контактов (м. р. к.).

Апериодическая составляющая тока короткого замыкания определяется в момент времени м. р. к. и оценивается параметром β , равным отношению апериодической составляющей тока к амплитуде периодической в момент расхождения контактов. Значения β приводятся в [28.18].

Под циклом операций понимают перечень коммутационных операций, который обязан совершить аппарат. Так, для выключателей, допускающих автоматическое повторное включение (АПВ), должны быть обеспечены циклы: 1) О — $t_{\text{от}}$ — ВО — 180 с — ВО и 2) О — 180 с — ВО — 180 с — ВО. Выключатели с $U_{\text{ном}} \leq 220$ кВ должны также выполнять работу в цикле О — $t_{\text{от}}$ — ВО — 20 с — ВО. Выключатели без АПВ должны выдерживать только цикл 2.

Здесь О — операция отключения; ВО — операция включения и немедленно следующая за нею операция отключения; $t_{\text{от}}$ — гарантируемая для выключателя минимальная бестоковая пауза при АПВ (время от погасания дуги во всех полюсах до появления тока при

последующем включении). Время $t_{бт}$ для различных выключателей находится в пределах 0,3—1,2 с, причем для выключателей, предназначенных для работы при быстродействующем АПВ (БАПВ), это время принимается равным 0,3 с. 180 с и 20 с обозначают время в секундах между операциями ВО.

Условия восстановления напряжения приведены в § 27.3.

4. *Номинальная мощность отключения* $P_{о, ном}$ — произведение номинального тока отключения на номинальное напряжение и на $\sqrt{3}$ (последний множитель для трехфазных выключателей).

5. *Стойкость при сквозных токах короткого замыкания* характеризуется токами термической стойкости I_T при заданном времени t_T и электродинамической стойкости I_d . Для аппаратов, имеющих разъемные контакты, вводится понятие тока сквозной стойкости (термической и динамической). Ток сквозной стойкости — это ток, который может пропускать через себя токоведущий контур аппарата при полностью включенном положении, когда нажатие контактов номинальное.

Ток термической стойкости связан с номинальным током отключения неравенством

$$I_T \geq I_{о, ном}$$

(время $t = 1 \div 3$ с при $U_{ном} \leq 220$ кВ и $t = 1 \div 2$ с при $U_{ном} \geq 330$ кВ).

При протекании тока I_T в течение времени t температура токоведущих частей не должна превышать допустимую для кратковременного режима работы.

Ток электродинамической стойкости определяется амплитудным значением ударного тока. Этот ток связан с током отключения неравенством

$$i_y \geq 1,8 \sqrt{2} I_{о, ном} = 2,55 I_{о, ном}.$$

6. *Номинальный ток включения* — ток короткого замыкания, который выключатель с соответствующим ему приводом способен включить без приваривания контактов и других повреждений при напряжении сети $U_{н, р}$ и заданном цикле операций. Ток включения определяется как его амплитудой ($i_{вкл} = 1,8 \sqrt{2} I_{о, ном}$), так и начальным действующим значением периодической слагающей ($I_{вкл} \geq I_{о, ном}$).

7. *Возвращающееся напряжение* — действующее значение напряжения промышленной частоты, появляющееся между токоподводящими проводами разных полюсов после погасания дуги во всех полюсах (возвращающееся междуполюсное напряжение) и на зажимах одного полюса после гашения дуги в нем (возвращающееся напряжение на полюсе).

8. *Восстанавливающееся напряжение на контактах полюса* — напряжение, появляющееся на первом гасящем полюсе прохода тока через нуль. Оно состоит из напряжения промышленной частоты и свободных составляющих (собственных частот).

9. *Коэффициент превышения амплитуды K_a восстанавливающегося напряжения* для одночастотного процесса — отношение наибольшего пика восстанавливающегося напряжения к амплитуде возвращающегося напряжения на по-

люсе. Коэффициент K_a в реальных установках колеблется в пределах 1,3—1,5 (см. § 27.3).

10. *Длительность дуги выключателя* — промежуток времени от момента возникновения дуги в полюсе, размыкающемся первым, до момента окончательного погасания дуги во всех полюсах. Для выключателей с шунтирующими резисторами различают длительность основной дуги, ток в которой не ограничен шунтирующим резистором, и вспомогательной дуги, в которой ток ограничен шунтирующим резистором.

11. *Собственное время отключения выключателя с приводом* — промежуток времени с момента подачи команды на отключение до момента начала расхождения дугогасительных контактов (для выключателей с шунтирующими резисторами следует различать время до момента расхождения основных контактов и то же для вспомогательных).

12. *Время отключения выключателя с приводом* — промежуток времени от момента подачи команды на отключение до момента погасания дуги во всех полюсах (для выключателей с шунтирующими резисторами следует различать время до момента погасания основной дуги и то же для вспомогательной дуги).

13. *Время включения (до возникновения тока в цепи) выключателя с приводом* — промежуток времени от момента подачи команды на включение до момента пробоя промежутка между сближающимися контактами при номинальном напряжении в сети. Для выключателя с шунтирующим резистором следует различать время до момента пробоя между сближающимися вспомогательными контактами и то же для основных.

14. *Бестоковая пауза выключателя при автоматическом повторном включении* — промежуток времени от момента погасания дуги во всех полюсах выключателя до момента возобновления тока в каком-либо полюсе выключателя.

15. *Испытательные напряжения* представлены в табл. 27.2.

Масляные выключатели

Баковые выключатели

а) *Гашение дуги простым разрывом в масле*. При размыкании контактов между ними загорается дуга. Под действием высокой температуры масло разлагается и дуга горит в атмосфере газов (водорода и метана). При прохождении тока через нуль она гаснет. После погасания дуги промежуток деионизируется за счет перемешивания горячих и холодных газов. Ввиду малой эффективности этот принцип используется только в выключателях 6—10 кВ и при токе отключения не выше 15 кА.

б) *Дугогасительные камеры газового автодутья*. Общая компоновка бакового масляного выключателя с дугогасительными камерами изображена на рис. 27.1.

Дугогасительное устройство (камера) этого выключателя показано на рис. 27.2. Каждая камера имеет два разрыва, использующих газовое автодутье. После расхождения контактов в каждом разрыве образуется дуга. Под дей-

Т а б л и ц а 27.2а. Нормированные испытательные напряжения

Класс напряжения, кВ	Напряжение грозовых импульсов для испытания											
	внутренней изоляции						внешней изоляции					
	относительно земли ¹		между контактами одного и того же полюса выключателей с уровнем изоляции между контактами				относительно земли ²		между контактами одного и того же полюса выключателей с уровнем изоляции между контактами			
	не повышенным		повышенным		не повышенным		повышенным					
Полный импульс	Срезанный импульс	Полный импульс	Срезанный импульс	Полный импульс	Срезанный импульс	Полный импульс	Срезанный импульс	Полный импульс	Срезанный импульс	Полный импульс	Срезанный импульс	
3	42	50	42	50	—	—	42	50	42	50	—	—
6	57	70	57	70	—	—	57	70	57	70	—	—
10	75	90	75	90	—	—	75	90	75	90	—	—
15	100	120	100	120	—	—	100	120	100	120	—	—
20	120	150	120	150	—	—	120	150	120	150	—	—
24	140	175	140	175	—	—	140	175	140	175	—	—
27	160	200	160	200	—	—	160	200	160	200	—	—
35	185	230	185	230	—	—	185	230	185	230	—	—
110	425	550	420	550	500	625	460	570	460	570	525	650
150	585	760	585	760	675	850	630	785	630	785	725	875
220	835	1090	835	1090	975	1250	900	1130	900	1130	1050	1300
330	1100	1300	—	—	1300	1500	1150	1350	—	—	1350	1550
500	1500	1800	—	—	1500	1800	1600	1950	—	—	1600	1950

¹ Для трехполюсных выключателей с расположением полюсов в общем баке — также между соседними² Для выключателей трехполюсного исполнения — также между соседними полюсами.³ Для выключателей категории размещения 1.⁴ Для выключателей трехполюсного исполнения классов напряжения от 3 до 35 кВ — также между со-

П р и м е ч а н и е. Нормированные испытательные напряжения для класса 750 кВ определяются ГОСТ

Т а б л и ц а 27.2б. Испытательные напряжения, кВ, выключателей переменного тока напряжением 750 кВ

Вид изоляции	Испытательное напряжение промышленной частоты, действующее значение	Импульсные испытательные напряжения, максимальное значение						
		грозовые		коммутационные				
		при плавном подъеме		Внутренняя и внешняя изоляция		Внутренняя изоляция	Внешняя изоляция	
		одноминутное	Внешняя изоляция	полный импульс	срезанный импульс		в сухом состоянии	под дождем
Изоляция относительно земли	950	1050	1900	2100	2550	1550	1550	1550
Изоляция между контактами одного и того же полюса выключателя	1400	1550	1350	2100	2550	2250	2250	2250

ствием высокой температуры дуги масло разлагается, выделяя газ. В камере в течение сотой доли секунды давление возрастает до нескольких мегапаскалей. При открытии телом подвижного контакта 7 дутьевой щели 11 начинается интенсивный обдув дуги выходящими газами. Дуга гаснет при первом прохождении тока через нуль после открытия щели. Наличие второй щели 12 обеспечивает надежную работу камеры во всем диапазоне отключаемых токов. Для выравнивания напряжения между камерами и облегчения гашения дуги в емкостных цепях камеры шунтированы резистором 10 сопротивлением 750 Ом. Отключе-

ние тока шунта происходит в свободном разрыве, образуемом между контактом траверсы 4 (рис. 27.1) и внешним контактом камеры 13 (рис. 27.2).

Камеры, использующие газовое автодутье, в настоящее время широко используются в выключателях на все классы напряжений (от 6 до 500 кВ) и токи отключения вплоть до 40 кА.

Баковые выключатели с дугогасительными камерами (см. рис. 27.1) позволяют удовлетворить все современные требования по напряжению, номинальному току, мощности отключения и быстрдействию. С целью сокращения

выключателей с нормальной изоляцией, кВ (по ГОСТ 1516.1.76)

Напряжения коммутационного импульса для испытания внешней (в сухом состоянии и под дождем) ³ и внутренней изоляции		Кратковременные напряжения промышленной частоты									
		одноминутное					при плавном подъеме				
		внутренней изоляции					внешней изоляции				
		относительно земли ⁴ выключателей		между контактами одного и того же полюса выключателей			относительно земли		между контактами одного и того же полюса		
относительно земли	между контактами одного и того же полюса	масляных	кроме масляных	масляных	кроме масляных	газонаполненных	в сухом состоянии	под дождем ^{2, 3}	в сухом состоянии	под дождем	
—	—	24	24	24	24	—	26	20	26	20	
—	—	32	32	32	32	—	34	26	34	26	
—	—	42	42	42	42	—	45	34	45	34	
—	—	55	55	55	55	—	60	45	60	45	
—	—	65	65	65	65	65	70	55	70	55	
—	—	75	75	75	75	—	80	65	80	65	
—	—	80	80	80	80	—	90	70	90	70	
—	—	95	95	95	95	95	105	85	105	85	
—	—	200	230	200	230	230	280	215	280	215	
—	—	275	300	275	300	300	355	290	355	290	
—	—	400	440	400	440	440	520	425	520	425	
950	1250	500	560	680	750	750	670	550	890	730	
1300	1730	700	760	940	1030	1030	900	740	1225	1000	

полюсами.

седниими полюсами.

20690.75. Частичные данные приведены в табл. 27.26.

Т а б л и ц а 27.2в. Испытательные напряжения, кВ, для выключателей напряжением 1150 кВ, рекомендуемые ВЭИ

Вид изоляции	Испытательные напряжения				
	Действующее значение промышленной частоты в течение 1 мин	Плавный подъем	Грозовой импульс, максимальное значение		Коммутационный импульс, максимальное значение
			полный	срезанный	
Изоляция относительно земли	1150	1300	2900	3200	2100
Изоляция между контактами одного и того же полюса: выключателя	2000	2000	2900	3200	3100
разъединителя	—	1500	3300	—	2400

объема масла при напряжениях выше 110 кВ целесообразно применять не цилиндрические баки, а эллиптические или чечевицеобразные.

С целью уменьшения массы масла и габаритов выключателя применяют высоковольтные вводы конденсаторного типа (см. § 19.5). Это дает возможность уменьшить диаметр вводов, сократить габариты трансформаторов тока. Для уменьшения размеров бака вводы располагаются в специальных цилиндрах, приваренных к баку (см. рис. 27.1).

Для получения быстродействующего АПВ в современных баковых выключателях должны применяться пневматические и пневмогидравлические приводы (см. § 27.6).

Маломасляные выключатели

В маломасляном выключателе отсутствует большой металлический бак. Дугогасительное устройство располагается либо в бачке из изоляционного материала (выключатели серий ВМП, ВМК), либо в металлических бачках небольшого диаметра (выключатели серии МГ).

На рис. 27.3 представлен широко распространенный выключатель ВМП-10 ($U_{ном}=10$ кВ; $I_{о,ном}=20$ кА; $P_{о,ном}=350$ МВ·А). Разрез дугогасительного устройства газового автодутья приведен на рис. 27.4.

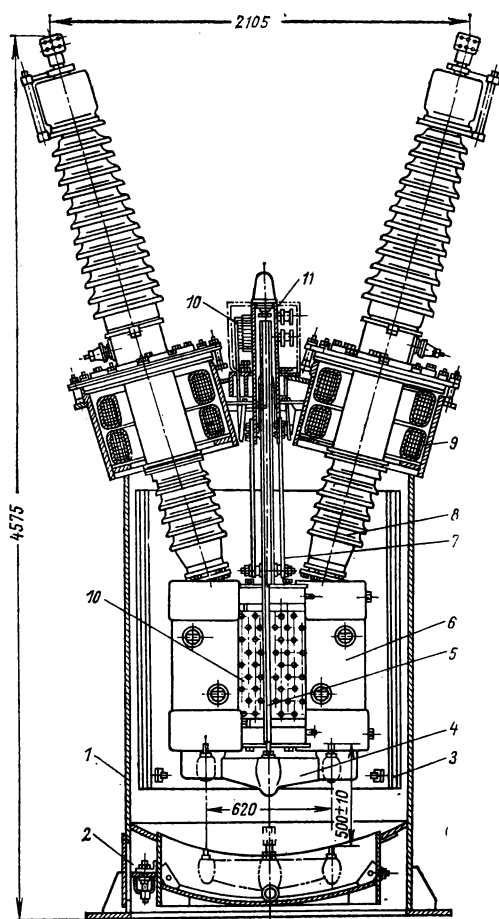


Рис. 27.1. Полус бакового выключателя У-110.8 (110 кВ; $I_{0,ном} = 42$ кА):

1 — бак; 2 — устройство подогрева масла; 3 — изоляция бака; 4 — траверса; 5 — штанга; 6 — дугогасительное устройство; 7 — направляющие штанги; 8 — маслонаполненный ввод; 9 — встроенный трансформатор тока; 10 — шунт; 11 — приводной механизм

Камера собирается из пластин фибры, гетинакса и электроизоляционного картона и стягивается изоляционными шпильками. Камера имеет три щели для гашения, одна из которых показана на рис. 27.4. Дутьевой канал идет сначала горизонтально, а потом вертикально. Для ограничения давления при больших токах и создания необходимого давления вблизи нулевого значения тока камера имеет воздушный буфер А. Давление достигает наибольшего значения вблизи максимума тока. Под действием этого давления масло сжимает воздух в буфере. Около нуля тока мощность в дуге и давление резко спадают. Энергия, накопленная в сжатом воздухе буфера, позволяет создать в камере дутье, необходимое для гашения дуги.

Следует отметить, что в дугогасительных устройствах с автодутьем подъем давления, необходимого для гашения дуги, создается за счет энергии, выделяемой электрической дугой. Поэтому большие токи (примерно от 3 кА

до номинального тока отключения) отключаются при малой длине дуги и малом времени ее горения благодаря тому, что энергия, выделяемая дугой, велика. Время горения дуги уменьшается с ростом тока и при номинальном токе отключения составляет 0,01—0,02 с. При малых токах (600—2000 А) энергия, выделяемая дугой, резко уменьшается, длина дуги, при которой она гаснет, увеличивается, длительность горения дуги возрастает до 0,05—0,08 с. Иногда ток в несколько десятков килоампер выключатель отключается легко за 0,01—0,02 с, а ток 600—2000 А индуктивного характера отключить не может. Поэтому при испытаниях обязательно проверяется работа при этих критических токах.

Ровенский завод высоковольтной аппаратуры выпускает выключатели ВК-10, обладающие высокими технико-экономическими показателями: малые габариты, номинальное напряжение 10 кВ, номинальный ток отключения 31,5 кА. Время отключения 0,07 с, время включения 0,075 с, номинальный ток до 1600 А, масса 160 кг. Общий вид выключателя представлен на рис. 27.5. Разрез полюса без привода дан на рис. 27.6. В выключателе используется дугогасительная камера с автодутьем.

Выключатель ВК-10 выкатного типа, предназначен для работы в КРУ и имеет розеточные внешние контакты.

Дугогасящее устройство выключателя с $I_{ном}$ до 1000 А выполнено в виде прочного изоляционного цилиндра 12, внутри которого размещены контактная система 4, 15 и пластины дугогасительного устройства. Гашение дуги с большим током происходит в самом начале хода свечи после размыкания контактов. При небольших токах короткого замыкания дуга удлиняется, затягивается в нижний объем дугогасительного устройства. Намечено создать 12 различных типоразмеров.

В маломасляных выключателях серий МГ на большую мощность отключения (3000 МВ·А при $U_{ном} = 20$ кВ) применяется по два стальных бака небольшого размера, в каждом из которых расположены камеры газового автодутья.

В настоящее время маломасляные выключатели строятся на все напряжения вплоть до 500 кВ.

На рис. 27.51 представлен трехфазный маломасляный выключатель серии ВМТ на напряжение 110 кВ, разработанный ПО «Урал-электротяжмаш». Выключатель имеет один разрыв на полюс. Номинальный ток 1000 А, номинальный ток отключения 20 кА, полное время отключения 0,08 с, минимальная бестоковая пауза 0,3 с, выключатель имеет единый пружинный привод на три полюса и может работать при низких температурах благодаря подогревающему устройству. Выключатель на напряжение 220 кВ имеет два разрыва на полюс и каждый полюс со своим приводом смонтирован на отдельной раме. Дугогасительное устройство выключателя представлено на рис. 27.7, а. Ток подводится к фланцу 1, с которого передается подвижному контакту 2. Неподвижный контакт розеточного типа. Дугогасительная камера 3 встречно-поперечного дутья (рис. 27.7, б). Под действием давления газов, образующихся благодаря высокой тем-

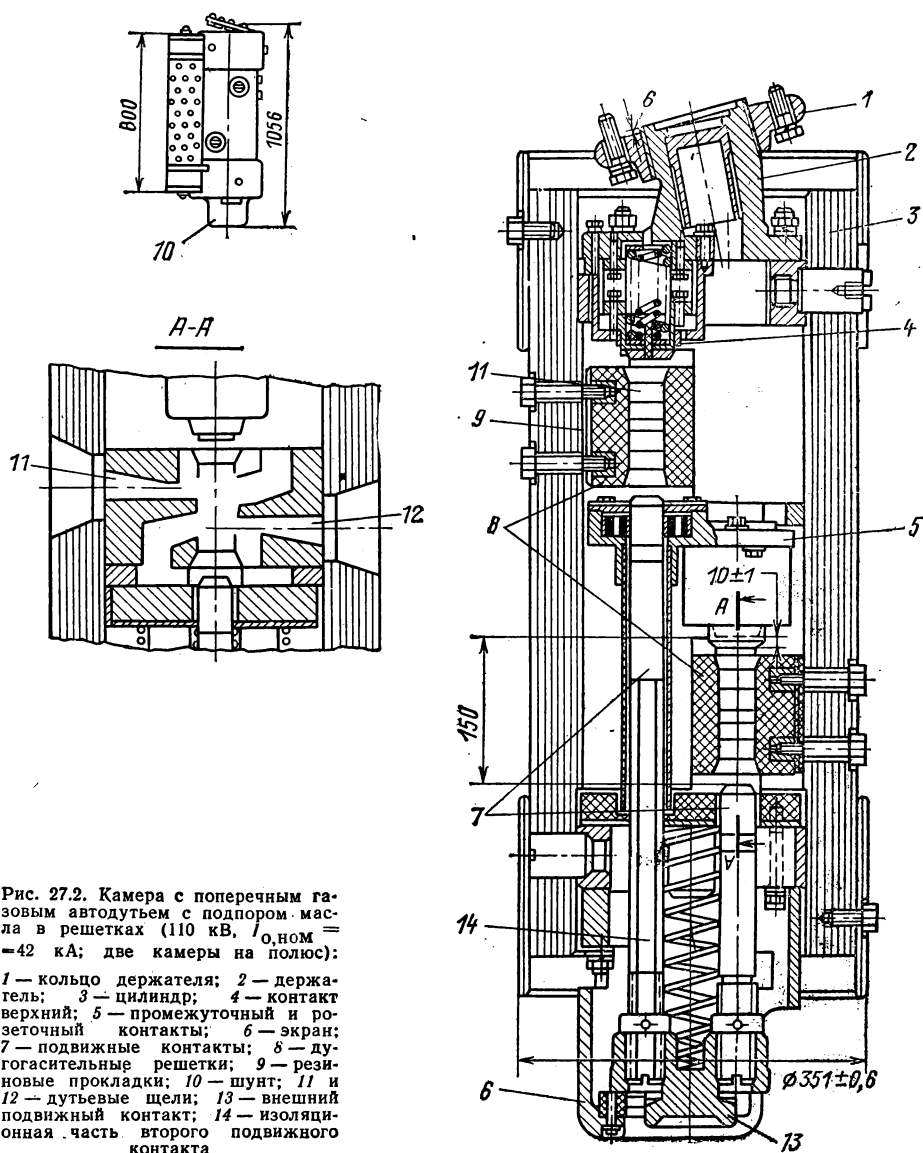
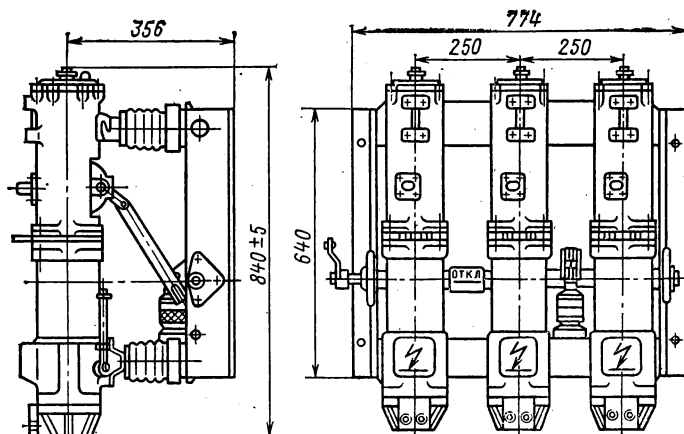


Рис. 27.3. Маломасляный выключатель ВМП-10



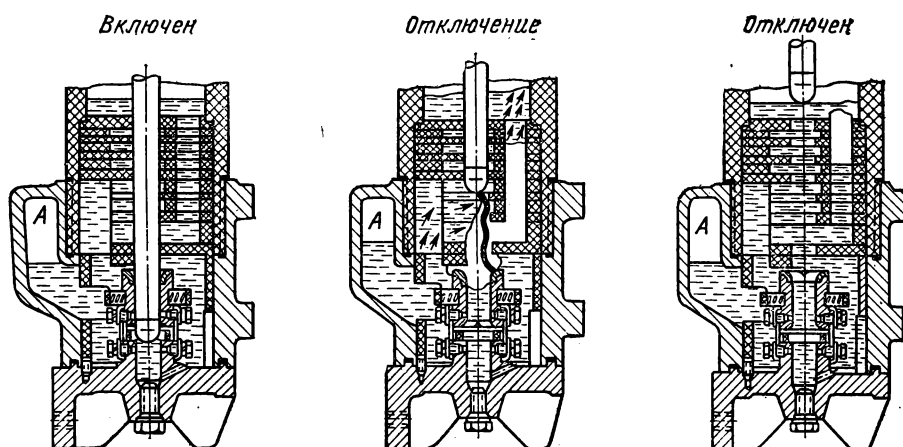


Рис. 27.4. Дугогасительная камера ВМП-10

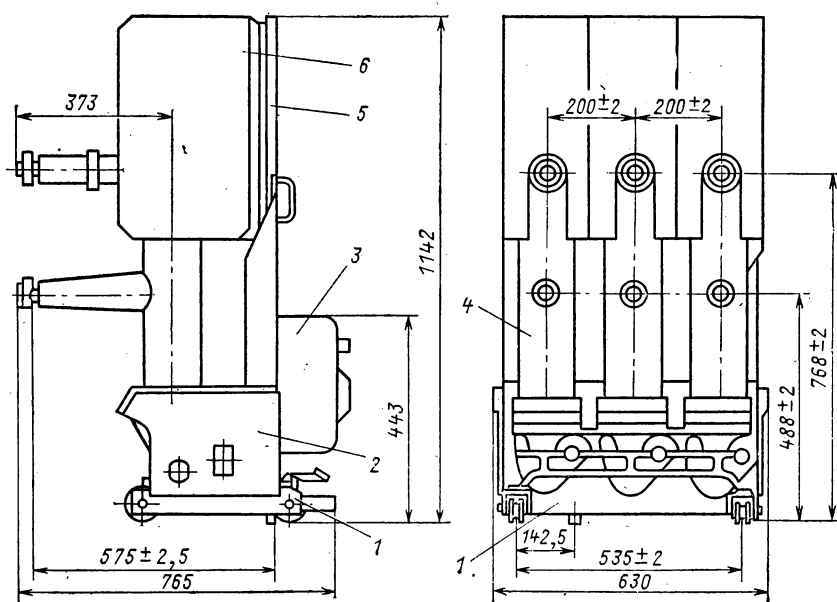


Рис. 27.5. Общий вид выключателя ВК-10 на 1250 и 1600 А:

1 — основание; 2 — пластина; 3 — пружинный привод; 4 — полюс; 5 — фасадная перегородка; 6 — изоляционный кожух

пературе дуги, поток масла каналов *A* направляется на дугу *B*. Соприкасаясь с дугой, масло превращается в газопаровую смесь, и эта смесь выбрасывается через канал *B*, при этом обеспечивается эффективное охлаждение дуги и быстрое ее гашение. Для надежной работы при отключении холостых линий сверху устройства имеется объем 4, заполненный сжатым воздухом или азотом при давлении 0,5—1,0 МПа. В выключателе оригинально решен вопрос привода подвижного контакта. Он соединен со стеклопластиковым стержнем пружинного привода. Это позволило уменьшить работу включения и отключения и облегчить привод выключателя.

Маломасляные выключатели обладают

следующими преимуществами: 1) малые размеры и масса масла; 2) удобны в эксплуатации, требуют малого времени для осмотра и ремонта; 3) путем применения унифицированных деталей и узлов выключатель довольно просто может развиваться по напряжению.

По сравнению с бакowymi маломасляные выключатели имеют недостатки: 1) они менее надежны в работе, изоляционные детали несут повышенные механические нагрузки, ниже мощность отключения; 2) маломасляные выключатели, как правило, не допускают установки встроенных трансформаторов тока.

В СССР маломасляные выключатели вытеснили баковые в установках с напряжением

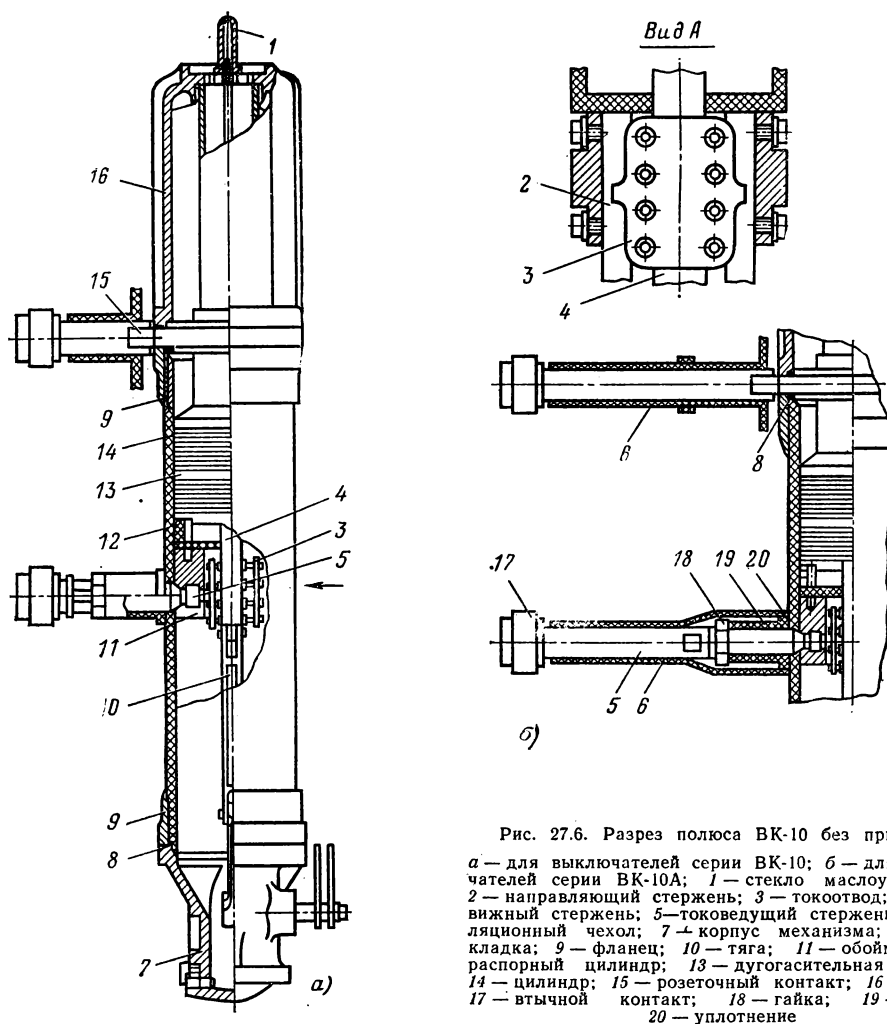


Рис. 27.6. Разрез полюса ВК-10 без привода:

а — для выключателей серии ВК-10; *б* — для выключателей серии ВК-10А; 1 — стекло маслоуказателя; 2 — направляющий стержень; 3 — токоотвод; 4 — подвижный стержень; 5 — токоведущий стержень; 6 — изоляционный чехол; 7 — корпус механизма; 8 — прокладка; 9 — фланец; 10 — тяга; 11 — обойма; 12 — распорный цилиндр; 13 — дугогасительная камера; 14 — цилиндр; 15 — розеточный контакт; 16 — кожух; 17 — втычной контакт; 18 — гайка; 19 — втулка; 20 — уплотнение

до 20 кВ. При напряжении 35—220 кВ и больших мощностях баковые выключатели получили преимущественное распространение.

При напряжении выше 330 кВ преимущества имеют маломасляные выключатели.

Воздушные выключатели

а) Дугогасительные камеры продольного дутья. В выключателях на напряжение более 35 кВ применяются камеры продольного дутья с полыми контактами (рис. 27.8). При подаче сжатого воздуха поршень 4 двигает с большой скоростью подвижный контакт 5. Между контактами образуется дуга. Сжатый воздух выходит из камеры через полости контактов, создавая мощное продольное дутье, при этом дуга сдувается с рабочей поверхности контактов, благодаря чему достигается их малый износ. Область, восстанавливающая электрическую прочность (находится между контактами), удалена от раскаленной поверхности. Изоляционные детали не используются для направления раскаленных продуктов дуги.

При данном сечении отверстий в контактах мощность отключения максимальна при

определенном расстоянии между контактами. Поскольку это расстояние недостаточно, чтобы выдержать испытательное напряжение при атмосферном давлении, изоляционное расстояние создается специальным отделителем, нож которого начинает двигаться после гашения дуги в камере. Когда расстояние между контактами отделителя достаточно, чтобы выдержать напряжение, приложенное к выключателю, подача воздуха в камеру прекращается и контакты смыкаются под действием пружины 3. Включение цепи осуществляется ножом отделителя.

Ток, отключаемый камерой продольного дутья, примерно обратно пропорционален скорости восстановления напряжения цепи. Поэтому при высоких скоростях восстановления напряжения камера шунтируется низкоомным резистором, переводящим процесс восстановления напряжения в аperiodический (см. § 27.3). Ток, ограниченный резистором, отключается вспомогательным разрывом (см. рис. 27.12).

При давлении в баке 2 МПа наибольшее напряжение, при котором может работать одна камера, не превышает 50—60 кВ. Усовершенствование камеры, увеличение давления в

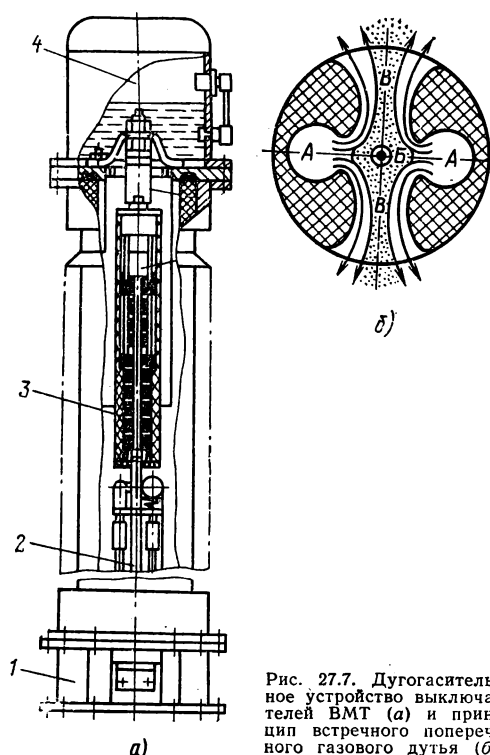


Рис. 27.7. Дугогасительное устройство выключателей ВМТ (а) и принцип встречного поперечного газового дутья (б)

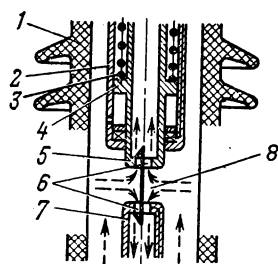


Рис. 27.8. Камера продольного дутья с полыми контактами:

1 — фарфоровая рубашка; 2 — металлический корпус; 3 — пружина; 4 — поршень; 5 — подвижный контакт; 6 — сопла камеры; 7 — неподвижный контакт; 8 — междуконтактный промежуток

баке до 4 МПа позволяют увеличить напряжение до 125 кВ. При напряжении выключателя, превышающем указанное, необходимо несколько камер соединять последовательно и применять шунтирующие делители, обеспечивающие равномерное распределение напряжения между камерами.

Камеры продольного дутья позволяют создать выключатель, удовлетворяющий самым высоким требованиям по мощности отключения, номинальному току и времени отключения. Наибольший ток отключения достигает 63 кА.

б) Дугогасительные камеры поперечного дутья (рис. 27.9) применяются при $U_{ном} = 10 \div 20$ кВ и $I_{о,ном} = 120$ кА.

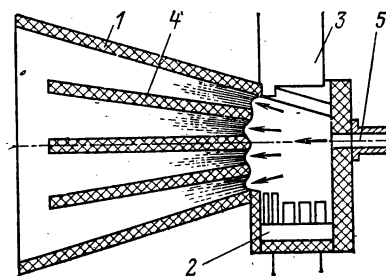


Рис. 27.9. Камера поперечного дутья:

1 — корпус; 2 — неподвижный контакт; 3 — подвижный контакт; 4 — перегородки; 5 — питающий воздухопровод

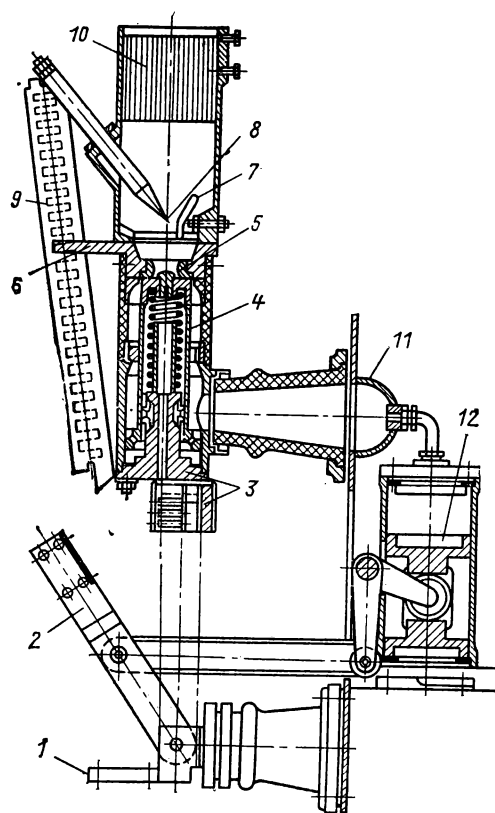


Рис. 27.10. Принципиальная схема выключателя с камерой продольного дутья (10 кВ, $I_{о,ном} = 57,8$ кА):

1 — нижний вывод; 2 — нож отделителя; 3 — неподвижный контакт отделителя; 4 — подвижный контакт; 5 — неподвижный контакт; 6 — верхний вывод; 7, 8 — электроды; 9 — шунтирующий резистор; 10 — глушитель; 11 — воздухоосборник; 12 — поршень отделителя

При размыкании контактов 2 и 3 между ними загорается дуга, которая гасится поперечным потоком воздуха, подаваемым по воздухопроводу 5. Под действием воздуха и перегородок 4 дугогасительной камеры 1 дуга принимает форму зигзага, при этом имеют место удлинение и эффективное охлаждение дуги.

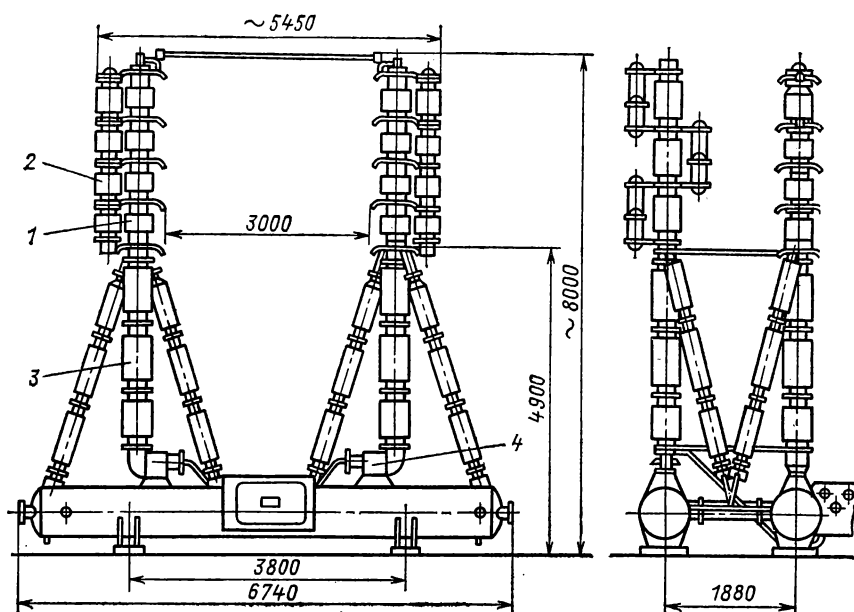


Рис. 27.11. Выключатель с газонаполненным отделителем (330 кВ, $I_{0,ном} = 26,2$ кА)

Большой габарит камеры, применение органической изоляции, соприкасающейся с дугой, ограничивают применение ее при напряжениях 10–20 кВ.

в) *Общая компоновка воздушных выключателей.* Выключатели с отделителем на открытом воздухе. Выключатель с $U_{ном} = 10 \div 20$ кВ и $I_{0,ном} = 50$ кА показан на рис. 27.10. При расхождении контактов 4 и 5 между ними загорается дуга, которая гасится продольным потоком сжатого воздуха. Восстанавливающееся напряжение пробивает между электродами 7, 8, и главный промежуток шунтируется резистором 9, переводящим процесс восстановления напряжения в апериодический. Остаточный ток резистора гасится воздушным потоком, омывающим электроды 7 и 8. Малое расстояние между этими электродами ограничивает перенапряжения, возникающие при отключении малых индуктивных токов. Одновременно с гашением дуги нарастает давление на верхнюю рабочую поверхность поршня 12. После гашения дуги приходит в движение нож 2 отделителя и создается необходимое изоляционное расстояние. В момент, когда это расстояние становится достаточным, прекращается подача воздуха в сборник 11 и подвижный контакт 4 возвращается в замкнутое положение. Включение производится подачей воздуха в нижнюю часть приводного цилиндра. Для охлаждения выхлопных газов и снижения шума служит глушитель 10.

Аналогичную конструкцию могут иметь выключатели до 220 кВ. Выключатель 220 кВ имеет четыре дугогасительных устройства на полюс. Напряжение равномерно распределяется с помощью активного делителя. Каждый разрыв шунтируется резистором 70 кОм. Вследствие ненадежной работы открытого отделителя такая компоновка рекомендуется при

напряжении не выше 20 кВ при работе в закрытом помещении.

Выключатели с газонаполненным отделителем. В воздушных выключателях на 110 кВ и выше вместо открытого отделителя используется воздухонаполненный (рис. 27.11). Дугогасительные камеры 1, снабженные шунтом 2, укреплены на полых изоляторах 3. Сжатый воздух подается в камеры клапаном 4. Каждый полюс имеет восемь основных разрывов (типа, изображенного на рис. 27.8), включенных последовательно. Воздухонаполненный отделитель имеет шесть разрывов, шунтированных емкостями, обеспечивающими равномерное распределение напряжения. Схема работы представлена на рис. 27.12. В стадии а размыкаются контакты гасительных камер и гасится мощная дуга. В стадии б расходятся контакты отделителя и гасится дуга с током, ограниченным резистором R, в стадии в подача воздуха в гасительные камеры прекращается, а контакты отделителя остаются разомкнутыми. Устройство разрыва отделителя поясняется на рис. 27.13.

При отключении в элемент отделителя подается сжатый воздух. Он воздействует на поршень подвижного контакта 1 и перемещает его вниз. Образующая дуга гаснет в зоне продольного дутья. Выхлоп происходит в замкнутый объем 2. В нижнем положении контакта 1 его поршень упирается в резиновую прокладку 3, при этом объем элемента герметизируется и в отключенном положении контакты находятся в среде сжатого воздуха, что позволяет сократить габариты отделителя. Для включения выключателя полость элемента сообщается с атмосферой.

В современных выключателях 110 кВ и выше стремятся отказаться от отделителя и перейти к воздухонаполненным дугогасительным камерам, в которых после гашения дуги

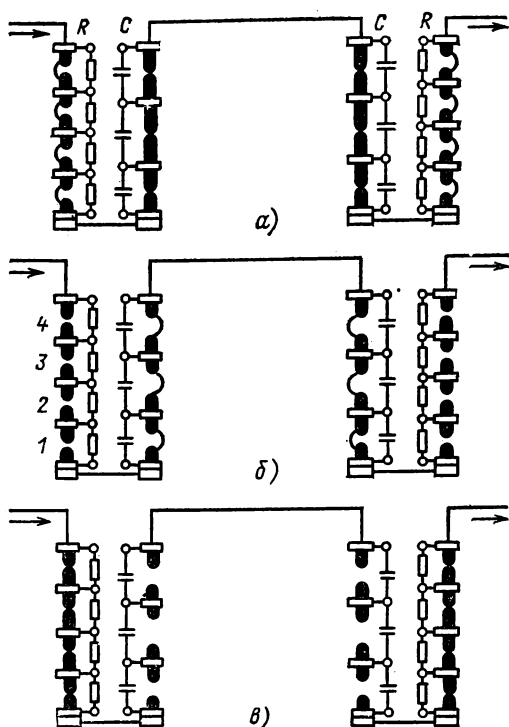


Рис. 27.12. Порядок работы контактов выключателя, изображенного на рис. 27.11

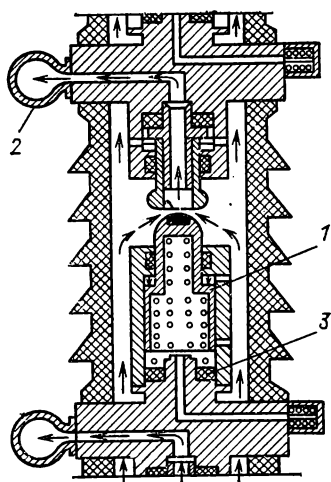


Рис. 27.13. Камера газонаполненного отделителя выключателя, изображенного на рис. 27.11

контакты разводятся на расстояние, достаточное, чтобы выдержать приложенное напряжение.

Внутренняя полость камеры в этот момент времени герметизирована и находится под давлением сжатого воздуха.

Выключатели с камерами в баке со сжатым воздухом были разработаны производственным объединением «Электроаппарат». Об-

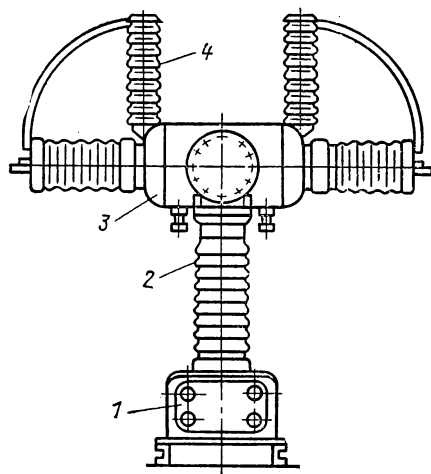


Рис. 27.14. Выключатель с камерами в баке со сжатым воздухом 110 кВ

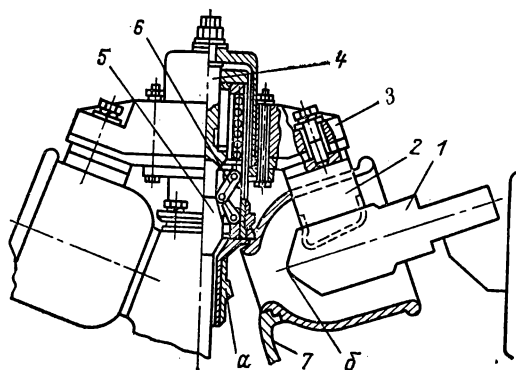


Рис. 27.15. Дугогасительная камера выключателя, изображенного на рис. 27.14

щий вид такого выключателя представлен на рис. 27.14. Дугогасительные камеры расположены непосредственно в баке со сжатым воздухом 3, укрепленном на опорном изоляторе 2. Равномерное распределение напряжения между двумя разрывами обеспечивается с помощью шунтирующих конденсаторов 4. В основании выключателя расположен шкаф управления 1.

Разрез дугогасительного устройства представлен на рис. 27.15. Во включенном положении ток от правого неподвижного контакта 1 через подвижный контакт 2 и траверсу 3 проходит на аналогичный левый контакт, укрепленный на токопроводящем стержне проходного изолятора. Подвижный контакт 2 укреплен на траверсе 3, которая в свою очередь связана с приводным штоком 4. Выступ 5 на штоке 4 служит для фиксирования механизма камеры во включенном и отключенном положениях с помощью механизма 6.

При отключении вначале дуга образуется между контактами 1 и 2. Сжатый воздух, вытекающий из бака через отверстие фланца 7, перемещает дугу, и она горит между точками а и б, защищенными от быстрой эрозии дуго-

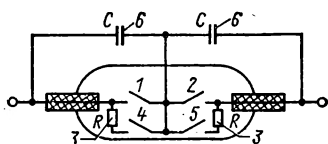


Рис. 27.16. Схема соединений главных и дугогасительных контактов выключателя серии ВВБ:

1, 2 — главные контакты; 3 — шунтирующие резисторы; 4, 5 — дугогасительные контакты; б — конденсаторы для выравнивания распределения напряжения

стойкой металлокерамикой. Контакты 1 и 2 шунтированы резистором с малым сопротивлением, что обеспечивает гашение дуги при первом переходе тока через нуль при самой высокой скорости восстановления напряжения. После этого расходятся контакты вспомогательного дугогасительного устройства, включенного последовательно с резистором — рис. 27.16.

Во включенном положении нижняя часть фланца 7 (рис. 27.15) закрыта клапаном, который разобщает полость бака с атмосферой. При отключении подается воздух в привод, который толкает шток 4 вверх, и одновременно открывается клапан, закрывающий фланец 7. После отключения клапан закрывается и бак разобщается с атмосферой.

По сравнению с выключателями, имеющими бак со сжатым воздухом в основании, потенциал которого равен потенциалу земли, эта компоновка имеет следующие преимущества: 1) давление воздуха в камере при гашении почти в 2 раза выше, чем у выключателей обычного типа; это повышает отключающую способность выключателя; 2) имеется возможность увеличения давления с 2 до 3,5—4 МПа, что еще сильнее интенсифицирует гашение дуги; 3) фарфоровые элементы выключателя не нагружены давлением сжатого воздуха, что резко повышает надежность работы выключателя; 4) увеличивается быстродействие выключателя за счет устранения времени наполнения длинных воздухопроводов большого сечения, через которые происходит наполнение камер сжатым воздухом; 5) габариты и масса уменьшаются на 20—30 %, расход воздуха сокращается в 2—2,5 раза; 6) благодаря применению шунтов понижается уровень перенапряжений, выключатель может быть сделан нечувствительным к скорости восстановления напряжения; 7) полная унификация узлов на все напряжения. Легкость развития в серию путем последовательного соединения модулей, аналогичных рис. 27.14, усиливается только опорная изоляция. В настоящее время эта серия модернизирована путем повышения давления до 4 МПа, применения дополнительного дутья через полый неподвижный контакт, использования пневматической системы управления. В результате ток отключения увеличился с 31,5 кА до 56 кА (220 кВ), серия продолжена до напряжения 1150 кВ, время отключения сократилось с 0,08 до 0,04 с. Эта серия называется ВВБК.

Серия выключателей ВНВ разработана ВЭИ совместно с заводом «Уралэлектротяжмаш» на напряжения 220—750 кВ и ток отключения до $I_{0,ном} = 63$ кА. Общий вид модуля на напряжение 250 кВ представлен на рис.

27.17. Выключатель на 500 кВ имеет два модуля, включенных последовательно, на 750 кВ — три модуля. Опорная изоляция усиливается соответственно классу напряжения. В настоящее время на базе ВНВ создан выключатель на напряжение 1150 кВ.

Разрез средней части дугогасительного устройства модуля дан на рис. 27.18. Дугогасительное устройство расположено внутри прочных стеклоэпоксидных труб 7, являющихся баком сжатого воздуха выключателя. Внешняя изоляция создается фарфоровой рубашкой 8. Дугогасительное устройство модуля имеет два разрыва 4. Подвижные контакты 3 и 5 имеют двухступенчатое движение. Вначале отходит контакт 5, и дуга загорается между контактом 3 и контактом 4, расстояние между которыми равно оптимальному. После гашения дуги контакт 3 отходит на расстояние, необходимое для выдерживания испытательного напряжения. Одновременно специальные клапаны закрывают выход воздуха из камеры через отверстия в контактах и герметизируют камеру. В отключенном состоянии между контактами находится сжатый воздух. Усилие, необходимое для разведения контактов, передается от привода, находящегося на потенциале земли, через легкую стеклопластиковую тягу.

При тяжелых условиях восстановления напряжения главный разрыв 3 шунтируется низкоомным резистором и вспомогательным разрывом 5 (рис. 27.17). Последний отключает ток, ограниченный шунтирующим резистором.

Рабочее давление 4 МПа. Номинальный ток отключения до 63 кА. Напряжение на один модуль 250 кВ. Полное время отключения не более 0,04 с.

По сравнению с выключателями серии ВВБ серия ВНВ имеет меньшие массу и габарит, большее быстродействие, проще в ремонте и эксплуатации.

Элегазовые выключатели

С целью дальнейшего увеличения мощности и сокращения габаритов в выключателях вместо сжатого воздуха начинают применять элегаз (SF_6), обладающий высокой электрической прочностью и дугогасящей способностью. Дугогасящая способность элегаза примерно в 4 раза выше, чем у воздуха. При давлении 0,2 МПа электрическая прочность элегаза приближается к прочности трансформаторного масла. Недостатком элегаза является высокая температура сжижения. При давлении 1,5 МПа температура сжижения газа составляет всего 6 °С. Чтобы избежать сжижения газа, специальная схема автоматики и нагреватель обеспечивают необходимую постоянную температуру газа.

Наиболее эффективно элегаз используется в том случае, когда струя газа с большой скоростью омывает горящую дугу.

Охлаждение дуги потоком газа можно получить в дугогасительном устройстве с автоматическим дутьем и дутьем, создающимся при переходе газа из бака с высоким давлением (1,5—2 МПа) в бак с низким давлением (0,2 МПа) — система с двойным давлением. Эта система требует подогрева газа, примене-

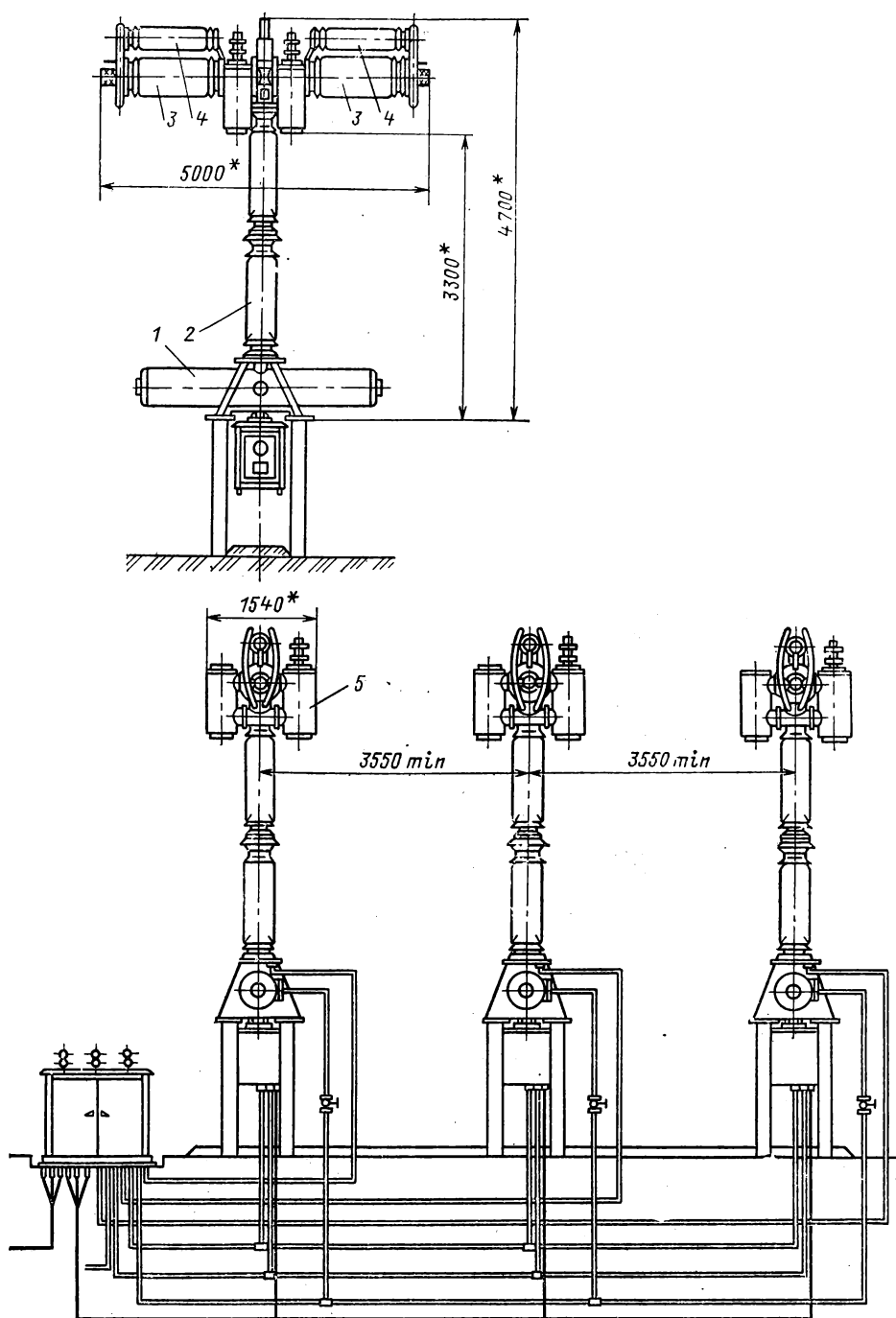


Рис. 27.17. Выключатель серии ВНВ ($U_{\text{ном}} = 220 \text{ кВ}$; $I_{0, \text{ном}} = 63 \text{ кА}$):

1 — бак со сжатым воздухом; 2 — опорный изолятор; 3 — основной дугогасительный разрыв; 4 — конденсатор для выравнивания распределения напряжения по разрывам; 5 — шунтирующий резистор с дугогасящим устройством для отключения тока резистора

ния системы автоматики, поддерживающей нужную температуру газа. Ввиду сложности и недостаточной надежности такого устройства в настоящее время получили преимуществен-

ное применение автокомпресссионные (автопневматические) выключатели.

Принципиальная схема дугогасительного устройства с автопневматическим дутьем при-

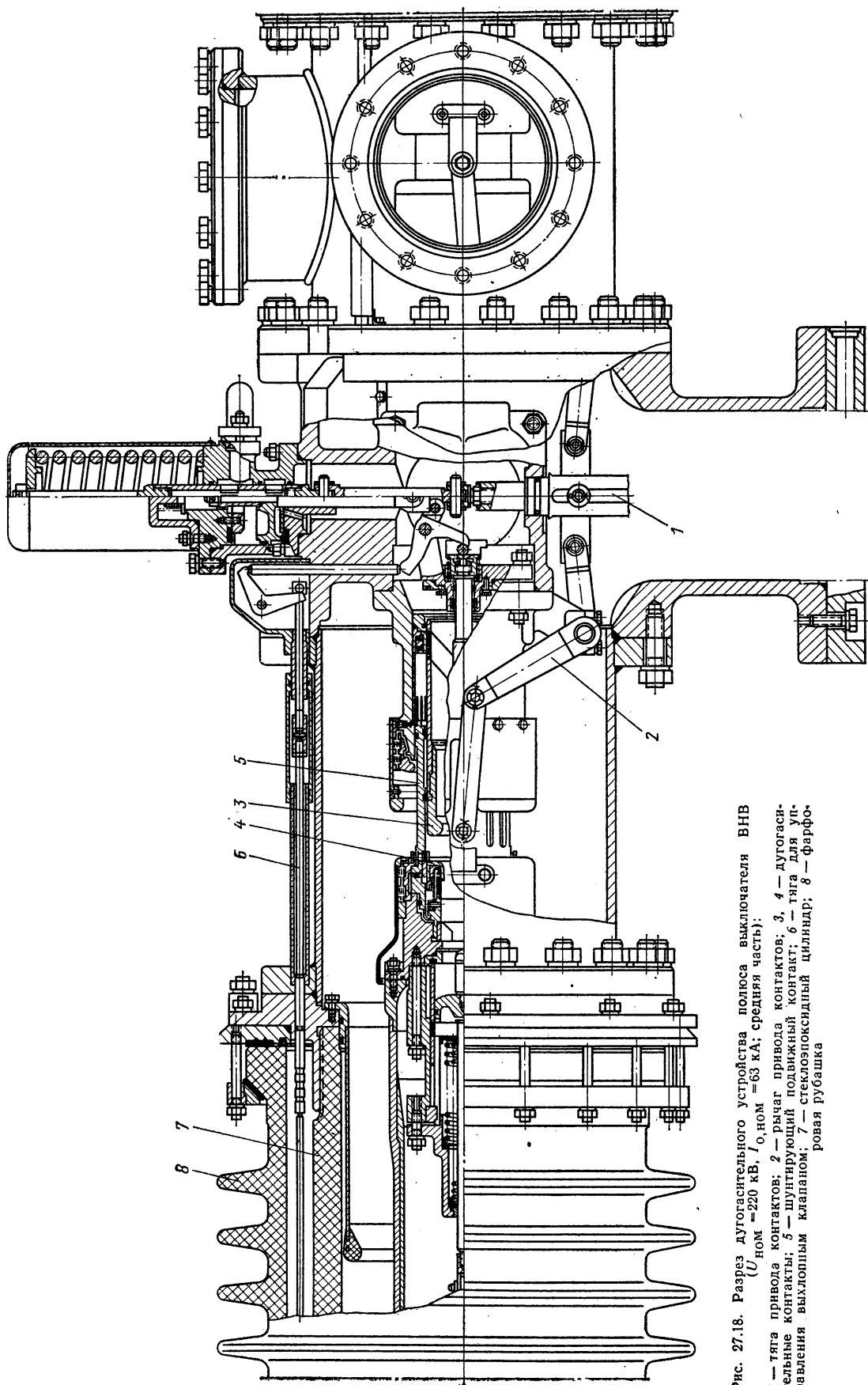


Рис. 27.18. Разрез дугогасительного устройства полюса выключателя ВНВ
 ($U_{\text{ном}} = 220 \text{ кВ}$, $I_{\text{о, ном}} = 63 \text{ кА}$; средняя часть).
 1 — тяга привода контактов; 2 — рычаг привода контактов; 3, 4 — дугогасительные контакты; 5 — шунтирующий подвижный контакт; 6 — тяга для управления выхлопным клапаном; 7 — стеклооксидный цилиндр; 8 — фарфоровая рубашка

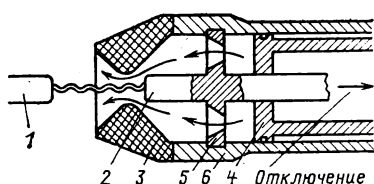


Рис. 27.19. Принципиальная схема автопневматического дугогасительного устройства элегазового выключателя

ведена на рис. 27.19. При отключении между неподвижным контактом 1 и подвижным контактом 2 возникает дуга. Вместе с контактом 2 движется сопло 3 из фторопласта (дугостойкий изоляционный материал), перегородка 5 и цилиндр 6. Поршень 4 неподвижен. Элегаз сжимается, и его поток, проходя через сопло 3, продольно охлаждает дугу и гасит ее. Дугогасительное устройство расположено в баке с элегазом при давлении газа 0,20—0,28 МПа.

Небольшое давление газа делает ненужной установку для подогрева газа.

В ВЭИ разработан выключатель с автопневматическим дутьем, один разрыв которого отключает ток 40 кА при напряжении 220 кВ. Соединение модулей таких выключателей позволяет получить аппарат на напряжение 1150 кВ.

Дугогасящее устройство ВЭИ изображено на рис. 27.20. Номинальный ток равен 1600 А, номинальный ток отключения 40 кА. Напряжение на один разрыв 110 кВ. Фланец вместе с поршнем закреплены неподвижно. При включении розеточный дугогасительный подвижный контакт 4 замыкается с трубчатым 7, а затем главный подвижный контакт 2 с неподвижным розеточным контактом 8. При отключении шток 5 двигает цилиндр 1 и между поршнем 6 и стенкой цилиндра создается область сжатого газа А. В этот же момент времени в области Б создается разрежение. После размыкания дугогасительных контактов возникает дуга, которая подвергается

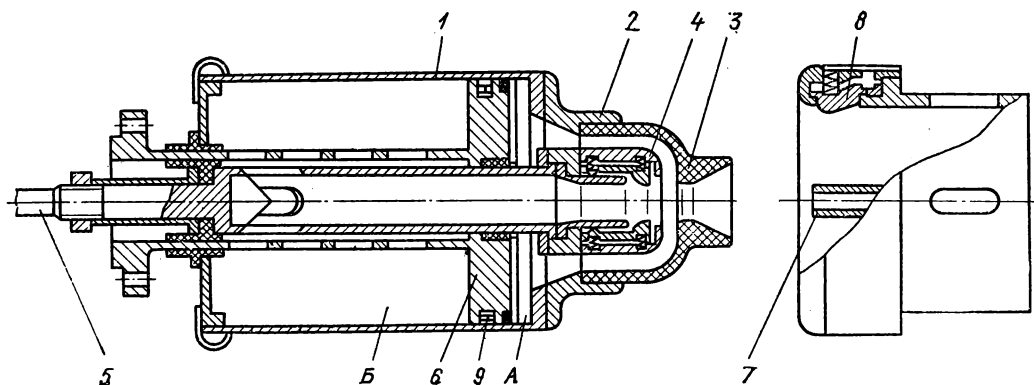


Рис. 27.20. Дугогасительное устройство (ДУ) элегазового выключателя ВЭИ ($U_{\text{ном}}=110$ кВ; $I_{\text{ном}}=1600$ А; $I_{\text{о, ном}}=40$ кА)

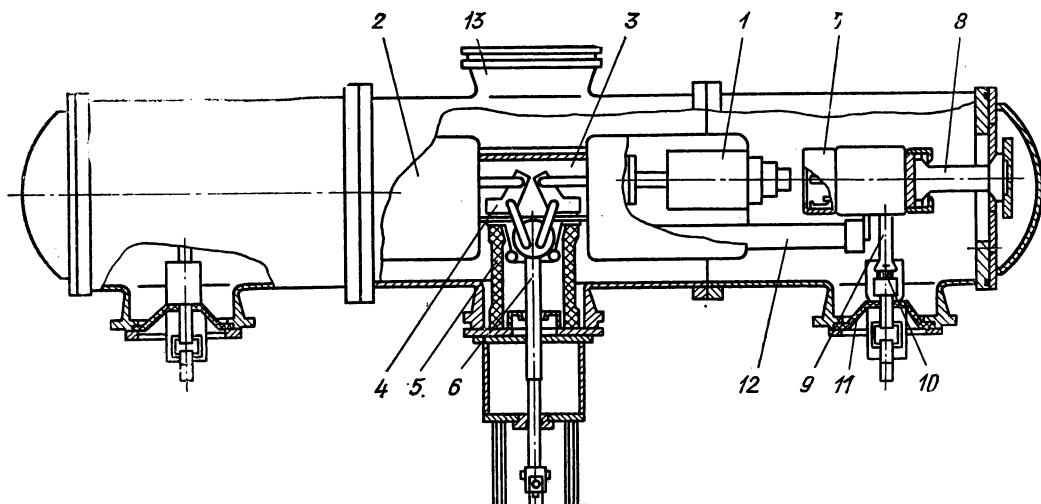


Рис. 27.21. Полус элегазового выключателя ВЭИ ($U_{\text{ном}}=220$ кВ; $I_{\text{ном}}=1600$ А; $I_{\text{о, ном}}=40$ кА)

интенсивному охлаждению за счет перетекания газа из полости *A* в полость *B*. После схода сопла *3* с контакта *7* дуга охлаждается потоком газа, выходящим через сопло *3*. Сопло *3* изготовлено из дугостойкого материала — фторопласта. Устройство расположено в баке выключателя, заполненном элегазом при давлении 0,45 МПа. За счет компрессии, получаемой с помощью поршня, создаются условия надкритического истечения элегаза, при которых дуга эффективно гасится. Полюс выключателя на напряжение 220 кВ для элегазового КРУ представлен на рис. 27.21. Он имеет два дугогасящих устройства. Неподвижный контакт *7* укреплен на фарфоровом изоляторе *8*. Вывод *9* неподвижного контакта через промежуточный контакт *10* и изоляционную перегородку *11* выходит из бака. Равномерное распределение напряжения по двум разрывам осуществляется конденсаторами *12*. Подвижный контакт *1* окружен экраном *2* для устранения короны. Контакты *1* приводятся в движение рычагами *4*, соединенными с тягой *6*, связанной с пневматическим приводом. Механизм *4* выключателя изолирован от бака полым изолятором *5*. Разрывы соединяются между собой трубой *3*.

Имеющиеся публикации говорят о том, что двухразрывный модуль автокомпрессионного выключателя может иметь номинальный ток отключения до 40 кА при напряжении 700 кВ.

Электромагнитные выключатели

Эскиз контактной и дугогасительной системы выключателя представлен на рис. 27.22. После размыкания дугогасительных контактов (подвижного *1*, неподвижного *2*) между ними загорается дуга, которая под действием электродинамических сил токоведущего контура и специального воздушного поршневого устройства, связанного с контактными рычагом *3*, вытягивается в положение *B*. При этом часть дуги *AE* шунтируется катушкой магнитного дутья *4*, имеющей малое сопротивление. Этот отрезок дуги гаснет. Весь ток перебрасывается в катушку *4*, которая во включенном положении током не обтекается. Сердечник *5* с полюсными наконечниками *6* создает в зоне горения дуги магнитное поле, которое, взаимодействуя с током дуги, с большой скоростью (до 100 м/с) перемещает ее вверх. Эта скорость определяется уравнением

$$v_d = 370 \sqrt{\delta i_d B},$$

где δ — ширина щели, м; i_d — ток дуги, А; B — индукция поперечного магнитного поля, Тл.

Дуга затягивается в камеру, выполненную из дугостойкой керамики с высокой теплопроводностью. По мере перемещения вверх дуга все более удлиняется, принимая форму горизонтального зигзага (рис. 27.22, б), при этом дуга соприкасается со стенками камеры и интенсивно отдает тепло. На каждый метр дуги ложится напряжение $190/\sqrt{\delta}$ В/м, где δ — ширина щели, м. Длина дуги l выбирается такой, чтобы напряжение на дуге в момент прохода тока через нуль $190 l/\sqrt{\delta} > U_v$ (мгновенного значения возвращающегося

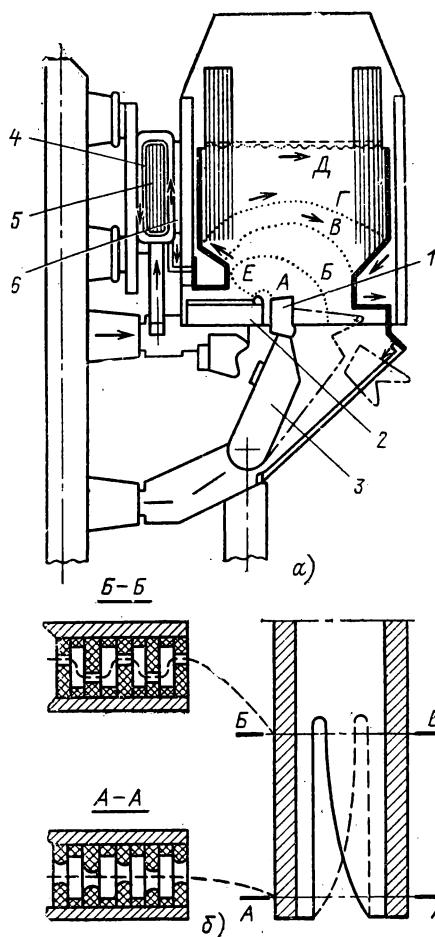


Рис. 27.22. Дугогасительная камера электромагнитного выключателя ВЭМ-6, 6 кВ:

а — разрез камеры; б — стадии растяжения дуги в камере

напряжения). Так как при гашении в цепь вводится большое сопротивление дуги $R_d \gg X_k$ (X_k — сопротивление цепи КЗ), то: а) уменьшается ток КЗ, б) уменьшается сдвиг фаз между ЭДС системы и током цепи в момент гашения дуги. Снижается коэффициент превышения амплитуды K_a . Все это резко облегчает условия гашения и делает работу выключателя независимой от собственной частоты цепи. Гашение дуги происходит за время 0,01–0,02 с.

Следует отметить, что при малом токе электродинамическая сила, затягивающая дугу в камеру, недостаточна, и для перемещения дуги используется воздушное поршневое устройство.

Преимуществами электромагнитного выключателя являются: 1) выключатель взрыво- и пожаробезопасен; 2) для его работы не требуется сжатого воздуха или трансформаторного масла; 3) малый износ контактов, дугостойкая камера, быстрое гашение дуги позволяют производить большое число операций включения и отключения без ревизии; 4) выключатель малочувствителен к собственной частоте отключаемой цепи.

При горении дуги керамические стенки дугогасительного устройства нагреваются до очень высоких температур и становятся проводящими. Это утяжеляет процесс восстановления электрической прочности. В связи с этим электромагнитные выключатели не строятся на напряжение выше 15 кВ.

Вакуумные выключатели

Простейшее дугогасительное устройство (камера) представляет собой цилиндрический сосуд из изоляционного материала (керамики), закрытый металлическими фланцами. Неподвижный торцевой контакт связан с одним фланцем, подвижный с помощью сильфона связан с другим. Из дугогасительного устройства выкачан воздух. Давление внутри камеры равно 10^{-7} — 10^{-10} Па. Нажатие подвижного контакта на неподвижный создается за счет атмосферного давления. При больших токах ставится дополнительная пружина.

При расхождении контактов вначале образуется жидкий металлический мостик из материала электродов. Этот мостик нагревается до высокой температуры и испаряется. Между контактами загорается дуга в среде паров металла электродов. Характерной особенностью дуги является малое напряжение на ней (20—40 В). Только при больших токах (10—100 кА) напряжение растет до 50—200 В. При прохождении тока через дугу гаснет. Малая плотность газа обуславливает исключительно высокую скорость диффузии зарядов погасшей дуги из-за большой разницы плотностей частиц в разряде и в вакууме.

Через 10 мкс после прохождения тока через дугу между контактами восстанавливается электрическая прочность вакуума, которая достигает 100 МВ/м. Благодаря высокой скорости нарастания электрической прочности промежутка вакуумный выключатель может работать при высоких скоростях восстановления напряжения и успешно используется при отключении емкостной нагрузки.

Ток отключения определяется количеством паров металла, испаряемого из электродов, что зависит от температуры электродов. Критическая температура, при которой происходит отказ в гашении, для меди равна 1280 °С, для вольфрама 3300 °С. В связи с этим в первых образцах вакуумных выключателей широко применялся вольфрам. Однако вольфрам обладает недостатками — высокое контактное сопротивление ограничивает номинальный ток. Кроме того, при подходе тока к нулю резко падает плотность паров вольфрама, дуга обрывается, возникает срез тока, при этом возникает перенапряжение, равное $\Delta U = i_{\text{обр}} \sqrt{L/C}$, где L и C — параметры отключаемой нагрузки. Напряжение на нагрузке достигает (6—8) $U_{\text{ном}}$, при этом происходит пробой изоляции в отключаемом оборудовании. Необходимо было либо ставить специальные разрядники, либо переходить на другой материал электродов.

В настоящее время широко применяются медь и ее сплавы или специальная металлокерамика. Для уменьшения количества паров металла, испаряемого из электродов, дуга быстро перемещается по поверхности контактов с по-

мощью магнитного поля, создаваемого отключаемым током.

В опытных образцах ДУ отключаемый ток доведен до 100 кА при напряжении 10 кВ.

Наибольшее напряжение, при котором работает дугогасительное устройство, достигает 80 кВ при токе отключения 40 кА. Выключатель на напряжение 160 кВ имеет два дугогасительных устройства, соединенных последовательно.

Большим достоинством вакуумных выключателей является большой срок службы. Механическая износостойкость достигает $5 \cdot 10^6$ операций. Число коммутаций с номинальным током около 600 А равно $(500-1000) \cdot 10^3$. Практически без ревизий выключатель может работать до 25 лет. Высокая надежность, быстрое действие, пожаро- и взрывоопасность, дешевизна эксплуатации, большие токи отключения делают вакуумные выключатели весьма перспективными. На рис. 27.23 представлено дугогасительное устройство, разработанное

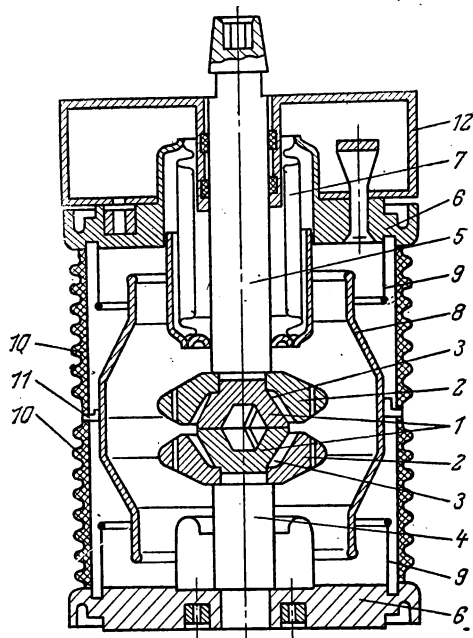


Рис. 27.23. Вакуумная дугогасительная камера КДВ-10-1600-20

ВЭИ им. В. И. Ленина. Номинальный ток проходит через торцевые контакты 1 в виде колец. Под действием магнитного поля дуга перебрасывается через зазор 3 на дугогасительные контакты (в виде спиралей) 2 и перемещается по ним с большой скоростью, благодаря чему уменьшается температура опорной точки дуги. Подвод тока к контактам осуществляется с помощью медных стержней 4 и 5. Подвижный контакт крепится к фланцу 6 с помощью сильфона 7 из нержавеющей стали. Металлические экраны 8 и 9 служат для выравнивания электрического поля и для защиты керамики 10 от напыления паров металла, образующихся при гашении дуги. Экран 8 крепится к корпусу с помощью кольца 11. Поступательное движение подвижного контакта

Таблица 27.3. Вакуумные дугогасительные камеры, разработанные ВЭИ

Параметры	Тип камеры							
	КДВ-21	КДВ-10-40-У2	КДВ-10-10/630 УХЛ2	КДВ-10-20/1600 УХЛ2	КДВ-10-31,5/3200 УХЛ2	КДВ-10-31,5/3200 УХЛ2	КДВ-35-20/1250 УХЛ2	КДВ-60
Номинальное напряжение, кВ	51	10	10	10	10	10	35	60
Номинальный ток, А	300	400	630	1600	1600	3200	1250	1250
Номинальный ток отключения, кА	2	5	10	20	31,5	31,5	20	20
Испытательное напряжение (1 мин, 50 Гц), кВ	56	32	42	42	42	42	95	130
Нормированное содержание аперiodической составляющей, %	—	50	60	35	35	35	30	30
Ход подвижного контакта, мм	5	5	12	12	14	14	18	36
Ресурс, циклы ВО:								
механический	1,2 · 10 ⁵	1 · 10 ⁵	2 · 10 ⁴	2 · 10 ⁴	2 · 10 ⁴	2 · 10 ⁴	2 · 10 ⁴	2 · 10 ⁴
при номинальном токе	1,2 · 10 ⁴	1 · 10 ³	2 · 10 ³	1 · 10 ³	2 · 10 ³	5 · 10 ³	2 · 10 ³	2 · 10 ³
при номинальном токе отключения	10	50	50	25	25	25	50	50
Диаметр корпуса, мм	100	100	150	150	167	167	170	200
Длина корпуса, мм	180	150	172	172	202	202	330	430
Масса, кг	4	3	8,8	9,5	12	14	16	25

обеспечивается корпусом 12, имеющим направляющую.

Параметры устройства КВД-10-1600-20: номинальное напряжение 10 кВ; номинальный ток 1600 А; сопротивление камеры 16 мкОм при дополнительном поджатии 1600 Н; номинальный ток отключения 20 кА; номинальное относительное содержание аперiodической составляющей 0,35; длительность дуги не более 0,02 с; предельный ток включения: а) амплитуда 51 кА, б) начальное действующее значение периодической составляющей 20 кА; предельный четырехсекундный ток термической стойкости 20 кА; амплитуда предельного сквозного тока 70 кА; средний ток среза не более 10 А; электрическая износостойкость 10 000 циклов ВО при номинальном токе 1600 А и 25 при номинальном токе отключения; механическая износостойкость 20 000 циклов ВО; допустимый износ контактов не более 4 мм; ход подвижного контакта 12 мм; скорости подвижного контакта: 1,7—2,3 м/с при отключении и 0,6—0,9 м/с при включении; камера обеспечивает работу в циклах по ГОСТ 687-78; минимальная бестоковая пауза 0,3 с; средний срок службы камеры 25 лет. Параметры вакуумных ДУ, разработанных ВЭИ и освоенных нашей промышленностью, приведены в табл. 27.3.

27.2. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

При конструировании и расчете элементов выключателей необходимо удовлетворить требованиям по безопасности, предъявляемым ГОСТ 12.2.007.0-75 [27.17] и ГОСТ 12.2.007.4-75 [27.18]. Первый ГОСТ рассматривает общие требования по безопасности электротехнического оборудования, второй — требования по безопасности электротехнических устройств на напряжение свыше 1000 В.

Расчет токоведущей цепи

Сечение токоведущих стержней вводов выбирается по табл. 27.4. Проверка на термическую стойкость производится согласно [27.6].

Таблица 27.4. Пропускная способность медных стержней при длительной нагрузке

Диаметр стержня, мм	10	14—16	20—22	30—33	38—42	42—54
Ток, А	100—200	200—400	500	1000	1500	2000

Для масляных выключателей на 110 и 220 кВ вводы стандартные (см. § 19.5).

Расчет и выбор контактов

Зависимость переходного сопротивления, Ом, от давления для свежезачищенных контактов (эмпирические формулы Н. Е. Лысова)

$$R_K = \frac{k}{(0,1 P_K)^m} 10^{-6},$$

где m и K — см. табл. 27.5; P_K — нажатие контактов, Н.

Изменение переходного сопротивления от температуры

$$R_K = R_{0K} [1 + 2/3 (\alpha_T \tau_{Kac})],$$

где α_T — температурный коэффициент сопротивления материала контактов; $\tau_{Kac} = T_{Kac} - T_0$ — превышение температуры точки касания относительно тела контакта; R_{0K} — переходное сопротивление контакта, определенное для температуры тела T_0 .

Таблица 27.5. Значения коэффициентов m и K в эмпирических формулах Н. Е. Лысова

Тип контакта	Материал	K	m
Торцевой контакт	Медь — медь	49,6	0,39
	Медь — латунь	203	0,5
	Латунь — латунь	226	0,373
Пальцевый самостанавливающийся контакт (без гибких связей)	Медь — латунь	123	0,183
	Латунь — латунь	192	0,306
Один сегмент розетки без гибкой связи. Диаметр расточки сегмента меньше диаметра стержня	Медь — медь	25,4	0,332
	Медь — латунь	67,7	0,372
	Латунь — латунь	95,5	0,136

Для простейшего однотоочечного контакта приближенно

$$R_{0k} = \frac{\rho_k \sqrt{\pi H_v \cdot 10^{-7}}}{2 \sqrt{P_k}},$$

где ρ_k — удельное сопротивление материала контакта при температуре T_0 , Ом·м; H_v — число Викакса.

Для однотоочечного торцевого контакта сила нажатия, H , определяется формулой Г. А. Кукекова:

$$P_k = I^2 \frac{A \pi H_v \cdot 10^{-7}}{16 \lambda^2 \left(\arccos \frac{T_0}{T_{кас}} \right)^2},$$

где P_k — сила нажатия контакта, Н; I — ток (действующее значение), А; A — число Лоренца, равное $2,42 \cdot 10^{-8}$ В²/С²; H_v — число Викакса; λ — теплопроводность, Вт/(м·°С); $T_{кас}$ — температура точки касания, К; T_0 — температура тела контакта в точке, достаточно удаленной от точки касания, К.

Для контактов, работающих в воздухе, T_0 определяется по закону Ньютона:

$$T_0 = \frac{I^2 \rho}{k_t p q} + \vartheta_0 + 273,$$

где I — ток, действующее значение, А; ρ — удельное сопротивление материала контактов, Ом·м; k_t — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); p — периметр сечения контактов, м; q — сечение контактов, м²; ϑ_0 — температура окружающей среды, °С.

Таблица 27.6. Значения коэффициента k для разных контактов

Тип контакта	Материал	k	По данным
Пальцевый несамоустанавливающийся, размер пальцев 12×35 мм	Медь — медь	4100	ВЭИ
То же	Латунь — медь	3800	
То же	Латунь — сталь	4800	
То же	Алюминий — латунь	5050	
Пальцевый самоустанавливающийся на один палец	Медь — латунь	5750	
Пальцевый самоустанавливающийся на пару пальцев	Медь — латунь	11 000	ПО «Электроаппарат»
Розеточный контакт (на один сегмент розетки)	Медь — медь	6000	
То же	Медь — латунь	5500	ПО «Уралэлектротяжмаш»
Торцевые контакты	Металлокерамика 40 % W + 60 % Cu	10 700	

При предварительном расчете T_0 можно принимать согласно ГОСТ 8024-69 для медных контактов $T_0 = (75^\circ\text{C} + 273)$. Для нормальной работы контактов

$$\tau_{кас} = T_{кас} - T_0 = 5 \div 10^\circ\text{C}.$$

Если контакт имеет несколько (n) точек касания (обычно 2, максимум 3), то расчет ведется по той же формуле, но вместо тока I берем ток через каждую контактную точку I/n .

Полная сила нажатия контакта $P_{кп} = P_k n$.

Для контакта, работающего в масле, температуру T_0 можно определить по эмпирической формуле

$$T_0 = \sqrt[4]{\left(\frac{I^2 \rho}{48 q p} \right)^4} + \vartheta_0 + 273.$$

Когда контакт образован смежными торцами двух длинных стержней одинакового по длине сечения, отдающих теплоту своей боковой поверхностью, температура точки касания $T_{кас}$ определяется уравнением

$$T_{кас} = \frac{1}{2} \frac{I^2 R_k}{\sqrt{k_t p \lambda q}} + \frac{I^2 \rho}{k_t p q} + \frac{(I R_k)^2}{8 \lambda \rho} + \vartheta_0 + 273,$$

где R_k — переходное сопротивление контактов.

Приближенно R_k можно рассчитать по формуле

$$R_k = \frac{\rho}{2 r_0} = \frac{\rho [1 + 2/3(\alpha \tau_{кас})]}{2 \sqrt{P_k}} \sqrt{\pi H_v \cdot 10^{-7}},$$

где $\tau_{кас}$ — превышение температуры точки касания относительно тела контакта, вначале можно считать $\tau_{кас} = 5 \div 10^\circ\text{C}$; r_0 — радиус площади контакта, м; α — температурный коэффициент сопротивления материала проводника, °С⁻¹; H_v — число Викакса; P_k — нажатие контактов, Н. Проверка контактов выключателя на «неприваривание» при протекании амплитуды ударного сквозного тока производится по формуле Г. В. Буткевича:

$$i_y^2 \frac{1}{k^2} < 0,1 P_k,$$

где k надо брать из табл. 27.6.

Торцевые контакты имеют то же значение k , что и пальцевые.

Т а б л и ц а 27.7. Значения коэффициентов m и n для разных контактов

Тип контакта	Материал	$P_K, Н$	n	m при времени протекания тока, с			
				0,1	1	5	10
Торцевой	Медь — латунь	50—500	0,365	3	2,17	1,81	1,6
То же	Латунь — латунь	50—500	0,365	1,85	1,4	1,18	1,1
Плоский самоустанавливающийся	Медь — медь	35—180	0,5	3,86	2,3	1,9	—
То же	Латунь — латунь	70—180	0,5	2,52	1,35	1,12	—
Сегмент розетки (3—4 точки касания)	Медь — медь	30—150	0,5	3,8	—	—	—

При использовании данного контакта при другом значении i_y нажатие меняется пропорционально квадрату тока:

$$i_{y1}^2 / i_{y2}^2 = P_{K1} / P_{K2}.$$

После расчета силы P_K по номинальному току $I_{ном}$ и ударному току i_y нажатие контактов выбирается равным наибольшему из полученных значений.

Амплитуда начального сваривающего тока (сила отрыва приваренных контактов не выше 5—10 Н), А, рассчитывается по формуле

$$I_{\lambda} = m \cdot 10^3 (0,1 P_K)^n.$$

Значения m и n даны в табл. 27.7.

Силы, необходимые для разрыва торцевых контактов после сварки, приведены в табл. 27.8. В контактах допустимо сваривание, но при условии, что их разрыв после сваривания не приводит к недопустимому снижению скорости отключения (с точки зрения дугогашения).

Примеры выполнения контактов. 1. Розеточный контакт маломасляного выключателя (рис. 27.24 и 27.25) $I_{ном}=600$ А; $i_y=52$ кА. Начальное нажатие 32,5 Н, конечное 40 Н. Провал каждого сегмента 2—2,25 мм.

Розеточный скользящий контакт без гибких связей (токосъемный контакт воздушных выключателей) может применяться как неподвижный и в масляных выключателях.

Для двух обоем $I_{ном}=1000$ А; $i_y=33,2$ кА; $I_{ном}=2000$ А ставятся три обоймы.

Т а б л и ц а 27.8. Силы, необходимые для разрыва торцевых контактов после сварки

Материал	$P_K, Н$	Время воздействия, с	Амплитудное значение тока, А	Сила для отрыва, Н
Медь — медь	1000	5	12 500	200
	5000	5	8600	50
	500	5	10 000	70
	500	5	12 000	120
	500	1	8700	50
	400	5	6800	50
	200	5	8000	200
	200	5	8000	150
	50	5	6100	50
	50	5	6300	50
	50	1	4880	10
	500	5	6500	170
Латунь — латунь	500	5	6000	100
	50	10	2600	50
	50	5	5300	2370
	50	5	2420	10

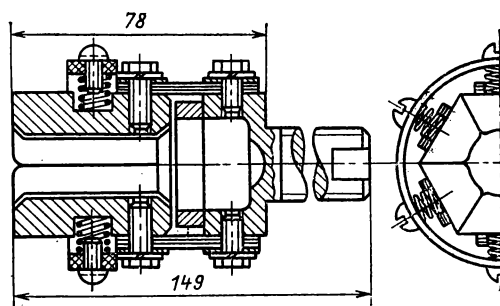


Рис. 27.24. Розеточный контакт

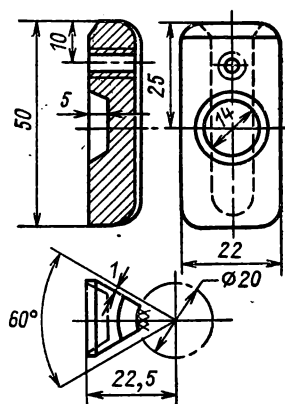


Рис. 27.25. Сегмент розеточного контакта на рис. 27.24; для получения линейного контакта диаметр подвижного контакта берется 22 мм

Нажатие сегментов (рис. 27.26 и 27.27) равно 55 Н.

2. Контакт мостикового типа с пластинами из металлокерамики серебро — вольфрам (рис. 27.28), $I_{ном}=800$ А; $i_y=50$ кА для масляного выключателя.

Начальное нажатие (на мостик) 430 Н, конечное 1050 Н. Провал контакта 8 мм.

3. Главный контакт маломасляного выключателя серии МГГ пальцевого типа (рис. 27.29 и 27.30). Число пальцев на разрыв 16 (две группы по 8 пальцев). Контактные поверхности покрыты серебром (20 мкм), $I_{ном}=4000$ А; $i_y=148$ кА (принято, что 25 % тока при коротком замыкании проходит через дугогасительный контур). Ток $I_{ном}$ до 5000 А, i_y до 170 кА.

Начальное нажатие пальца на нож 90 Н, конечное 140 Н, ход в контактах 35 мм.

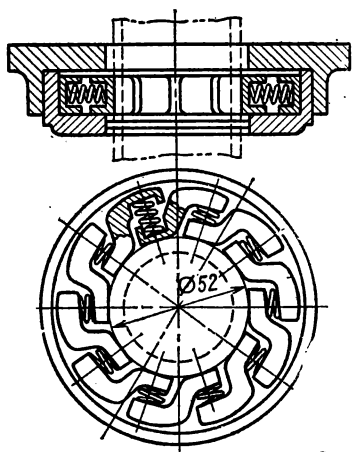


Рис. 27.26. Розеточный скользящий контакт

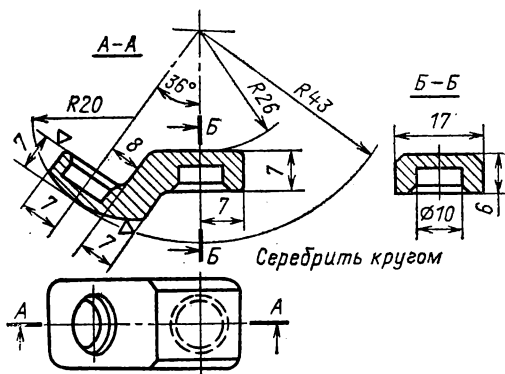


Рис. 27.27. Сегмент розеточного скользящего контакта

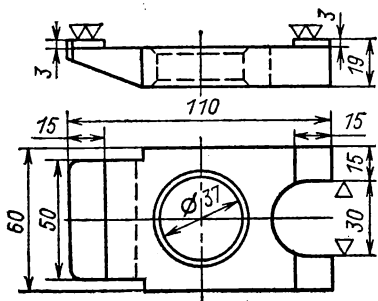


Рис. 27.28. Контакт МКП-110

Расчет электродинамических сил

Электродинамическая сила между проводниками, Н,

$$P = i_1 i_2 \cdot 10^{-7} k_{1/2},$$

где i_1 и i_2 — токи в первом и втором проводниках, А; $k_{1/2}$ — коэффициент, зависящий от взаимного расположения проводников (геометрический фактор).

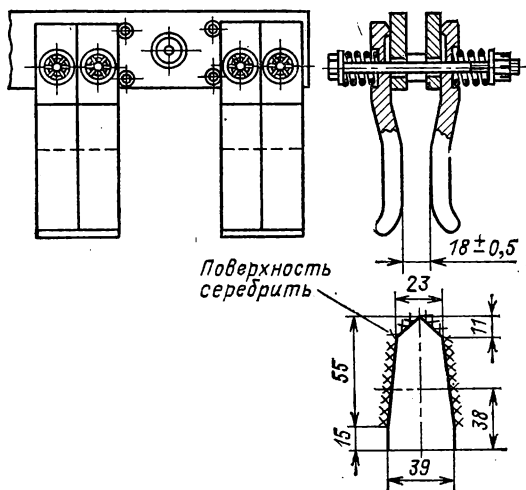


Рис. 27.29. Главный контакт выключателей серий МГГ, МГ

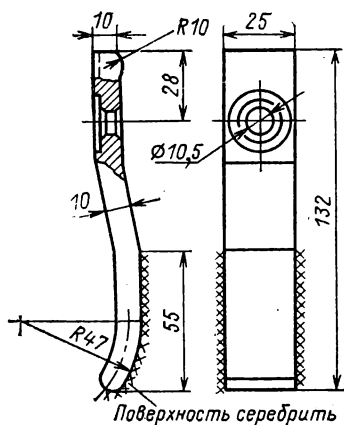


Рис. 27.30. Сегмент подвижного контакта системы на рис. 27.29

Момент M_0 , развиваемый электродинамическими силами, Н·м, относительно точки О равен:

$$M_0 = i_1 i_2 \cdot 10^{-7} m_{1/2}^0,$$

где $m_{1/2}^0$ — коэффициент, зависящий от расположения проводников.

Значения коэффициентов $k_{1/2}$ и $m_{1/2}^0$ для различных случаев расположения проводников приведены в [27.7, 27.13].

Электродинамические силы при протекании по проводникам переменного тока определяются по той же формуле. При подстановке в формулу мгновенных значений токов P будет выражать мгновенную силу. Если i_1 и i_2 находятся в одинаковой фазе (или сдвинуты на π), то при подстановке действующих значений токов P будет выражать среднюю за период силу.

В трехфазной системе токи в проводниках различных фаз сдвинуты на $2\pi/3$. При расположении проводников, указанном на рис. 27.31, на проводник каждой фазы будет действовать

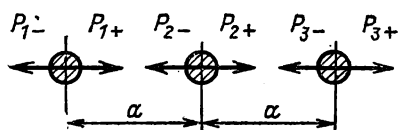


Рис. 27.31. Направления сил в трехфазной системе проводников

знакопеременная сила. Максимальные за период значения электродинамических сил, Н, действующих на проводники, определяются по формулам

$$P_{1+} = P_{3-} = 10^{-7} \cdot 0,11 I^2 k_{1/2};$$

$$P_{1-} = P_{3+} = 10^{-7} \cdot 1,61 I^2 k_{1/2};$$

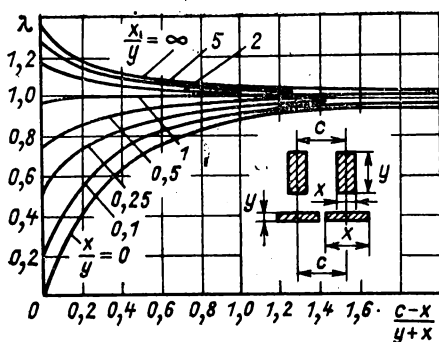
$$P_{2+} = P_{2-} = 10^{-7} \cdot \sqrt{3} I^2 k_{1/2}.$$

Здесь $k_{1/2}$ — геометрический фактор [27.7, 27.13]; I — действующее значение тока.

Если проводники имеют прямоугольное сечение, то сила, Н, вычисляется по формуле

$$P = 10^{-7} I_1 I_2 k_{1/2} \lambda,$$

где λ — коэффициент, зависящий от ширины x и высоты y сечения проводников и расстояния c между ними; λ определяется по кривым рис. 27.32.

Рис. 27.32. Кривые поправочных коэффициентов λ

Электродинамическая сила, Н, возникающая в месте соприкосновения контактов и стремящаяся их разомкнуть, равна:

$$P_{отб} = 10^{-7} i_y^2 \ln \sqrt{\frac{q_1}{q_2}},$$

где q_1 — площадь сечения контакта, м²; q_2 — площадь смятия в точке касания, м².

Расчет траверсы

Сечение траверсы и ее форма выбираются по изгибающему моменту, Н·м, в месте крепления со штангой:

$$M = 10^{-7} i_y^2 \left(\ln \frac{a}{4r_c} + \frac{2r_c}{a} + 0,25 \right) + P_k \frac{a}{2},$$

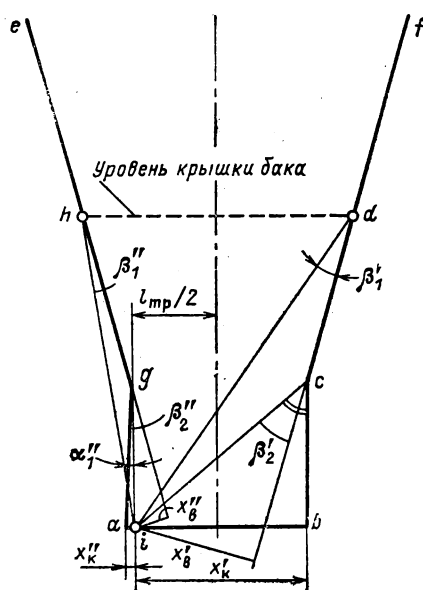


Рис. 27.33. Расчет электродинамических сил графоаналитическим методом

где a — расстояние между осями токоведущих стержней вводов, м; r_c — радиус сечения стержней, м; P_k — сила контактного нажатия, действующая на конец траверсы, Н.

Проверка на термическую стойкость проводится по данным [27.6]. При наклонных вводах силу и момент, действующие на траверсу, находят графоаналитическим путем.

Для определения силы в интересующей нас точке i находим результирующую индукцию от всех отрезков контура (рис. 27.33).

Индукция от контактов камеры $B_k = B'_k + B''_k$

$$B'_k = 10^{-7} \frac{i_y \cos \alpha'_1}{x'_k}; \quad B''_k = 10^{-7} \frac{i_y \cos \alpha''_1}{x''_k}.$$

Индукция от наклонных стержней вводов (часть вводов вне бака не учитываем вследствие экранировки) $B_b = B'_b + B''_b$, где

$$B'_b = 10^{-7} i_y \frac{\cos \beta'_1 - \cos \beta'_2}{x'_b};$$

$$B''_b = 10^{-7} i_y \frac{\cos \beta''_1 - \cos \beta''_2}{x''_b}.$$

Сила, действующая на участок Δl ,

$$p_{уд} \Delta l = (B_k + B_b) i_y \Delta l.$$

Полная сила, действующая на траверсу,

$$P = \sum_{i=1}^m p_{уд} i \Delta l_i.$$

Момент в точке крепления траверсы

$$M = \sum_{i=1}^{m/2} p_{уд} i \Delta l_i x_i + P_k \frac{l_{тр}}{2};$$

в точке крепления $x_i = 0$.

Расчет прочности изоляторов вводов

При расчете прочности принимают, что результирующая сила прикладывается к концу ввода.

Механическое напряжение на изгиб $\sigma_{изг}$, действующее в заделке,

$$\sigma_{изг} = P_{рез} l / W,$$

где l — плечо $P_{рез}$ относительно места заделки, м; $P_{рез}$ находим по формулам § 27.2 и [28.12]; W — момент сопротивления, $м^3$.

Обычно $\sigma_{изг, доп} = (1/2 \div 1/3)$; $\sigma_{изг, разр}$ — по табл. 13.17. Допустимое значение σ зависит также от толщины изделия.

В случае расположения трех фаз в одном баке учитывается влияние вводов других фаз, причем рассматриваются все возможные варианты усилий при трехфазном и двухфазном коротких замыканиях. Вначале рассчитывается сила, действующая на ввод фазы b при трехфазном коротком замыкании. Расчетный ток для всех фаз i_y .

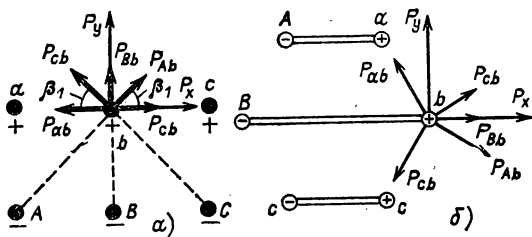


Рис. 27.34. Направление усилий, действующих на вводы

Вводы расположены по контуру прямоугольника (рис. 27.34):

$$P_b = \sqrt{P_{xb}^2 + P_{yb}^2};$$

$$P_{xb} = -P_{ab} + P_{cb} + P_{Ab} \cos \beta_1 - P_{Cb} \cos \beta_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} i_y^2 (-k_{ab} + k_{Ab} \cos \beta_1) \sin(2\omega t - 240^\circ),$$

где k_{ab} — сила взаимодействия между стержнями a и b при $i_y = 1$ А;

$$P_{yb} = P_{Bb} + P_{Ab} \sin \beta_1 + P_{Cb} \sin \beta_1 = i_y^2 (k_{Bb} - k_{Ab} \sin \beta_1) \sin^2 \omega t;$$

P_b находим для ωt , определяемого $dP_b/dt = 0$.

Вводы расположены по контуру правильного шестиугольника (рис. 27.34, а):

$$P_b = \sqrt{P_{xb}^2 + P_{yb}^2};$$

$$P_{xb} = i_y^2 \left(k_{Bb} + \frac{1}{2} k_{ab} - \frac{\sqrt{3}}{2} k_{ab} \right) \times \sin^2(\omega t - 120^\circ);$$

$$P_{yb} = i_y^2 \frac{\sqrt{3}}{4} (\sqrt{3} k_{ab} - k_{Ab}) \sin(2\omega t - 240^\circ).$$

Аналогично рассчитываются силы, действующие на ввод a при трехфазном и на вводы b и a при двухфазных коротких замыканиях.

Расчетный ток при двухфазном коротком замыкании равен $i_y \sqrt{3/2}$.

Если трудно аналитически найти ωt , соответствующее максимуму силы, то, задаваясь ωt в пределах $0-2\pi$, строят $P = f(\omega t)$ и находят максимум-максимум этой силы.

Проверка прочности верхней части изоляторов вводов производится с учетом электродинамических сил, действующих между проводящими шинами. При расчете необходимо учитывать механические силы, создаваемые присоединяемыми проводами.

Элементы расчета воздушных выключателей

Дуга, образующаяся между контактами камеры, является мощным источником теплоты, который за очень короткое время нагревает воздух, поступающий в сопло. При этом резко поднимается давление в области горячей дуги (образуется так называемое противодавление основному потоку) и скорость истечения воздуха, а следовательно, и охлаждение дуги резко сокращаются.

Возможно вообще прекращение дуги (закупорка сопла). Диаметр сопла выбирается таким образом, чтобы даже при максимальном значении тока, когда торможение воздушного потока наибольшее, скорость воздуха не падала ниже $8-10$ м/с [27.4].

Для камер с двумя полыми контактами при давлении в камере $p_k = 1$ МПа диаметр сопла d , см, можно определить по формуле

$$d = 2,77 \cdot 10^{-2} \sqrt{I_{0,ном}},$$

где $I_{0,ном}$ — номинальный ток отключения, А.

Оптимальное расстояние между контактами с точки зрения гашения дуги для камер с двусторонним дутьем

$$h_{опт} \approx (0,4 \div 0,45) d.$$

Расстояние между контактами в положении отключено определяется формулой

$$h_k = \frac{U_{исп} k_n}{n E_{пр}},$$

где $U_{исп}$ — испытательное напряжение выключателя (промышленной частоты), кВ; k_n — коэффициент неравномерности распределения напряжения между разрывами, обычно $k_n = 1,05 \div 1,1$; n — число разрывов на полюс; $E_{пр}$ — электрическая прочность воздуха, кВ/м [в условиях быстротекущего воздуха $E_{пр} = 3,5 \div 4,5$ МВ/м при давлении в камере $p_k = (0,9 \div 1)$ МПа].

Если в отключенном состоянии воздух в камере неподвижен, то его прочность значительно увеличивается.

Число разрывов определяется исходя из имеющихся опытных данных для одного разрыва принятого варианта конструкции.

При давлении в баке 2 МПа разрыв работает при напряжении $50-60$ кВ. При дав-

лении 4 МПа напряжение на разрыве может быть увеличено до 125 кВ.

После выбора диаметра сопла производится расчет кривой восстанавливающейся электрической прочности.

Подробный расчет дугогасительного устройства воздушного выключателя и его пневматических элементов управления рассмотрен в [27.14]. Там же приведен конкретный пример расчета дугогасительного устройства выключателя серии ВНВ на напряжение 750 кВ, номинальный ток отключения 63 кА и номинальный ток 4 кА.

Элементы расчета масляных выключателей

Механизмы масляных выключателей

Для успешного гашения дуги скорость в момент размыкания контактов колеблется от 1,5 до 10 м/с в зависимости от конструкции примененного дугогасительного устройства. При отключении используется, как правило, энергия пружин, которые заводятся при включении приводов.

Для расчета скорости контактов удобно пользоваться уравнением энергетического баланса

$$\frac{m_{\text{привед}} v^2}{2} = \int_0^H P_{\text{движ}} dH - \int_0^H P_{\text{торм}} dH = A_{\text{движ}} - A_{\text{торм}},$$

где $m_{\text{привед}}$ — масса подвижных частей механизма, приведенная к подвижному контакту; v — скорость подвижного контакта; $A_{\text{движ}}$ — работа движущих сил (в основном работа отключающих пружин механизма, пружин буфера включения, пружин дугогасительных камер, пружин торцевых контактов, сил веса, если они помогают движению); $A_{\text{торм}}$ — работа сил, препятствующих движению (силы трения механизма, силы буферных устройств отключения, сил веса, если они противодействуют движению).

В результате расчета получают $v=f(H)$.

Так как $v=dH/dt$, то, воспользовавшись методом графического интегрирования, можно получить $H=f(t)$ и $v=f(t)$.

В конце хода для смятения ударов механизма ставится масляный буфер постоянного давления.

Расчет давления

После расхождения контактов в дугогасительном устройстве автогазового дутья (рис. 27.35) загорается дуга, масло разлагается на газы (H_2 ; C_4H_4 и др.) и образуются пары масла.

Каждый килоджоуль энергии выделяет 70 см³ газа, приведенных к нормальной температуре (293 К) и нормальному давлению (0,1 МПа). В действительности выделенный газ находится при высокой температуре (сред-

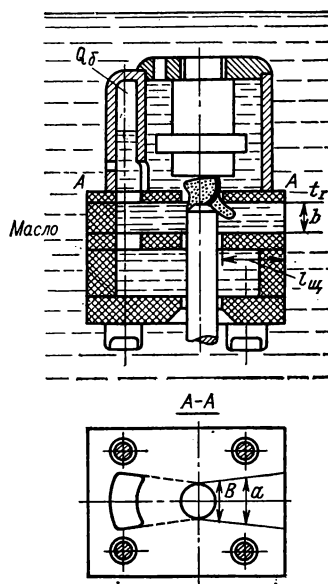


Рис. 27.35. Дугогасящее устройство газового автодутья

няя температура газового пузыря около 800 К) и высоком давлении до 6 МПа. Различают два режима работы — режим замкнутого пузыря и режим газового дутья.

Режим замкнутого пузыря

Газ, образующийся в камере после размыкания контактов, занимает объем, освобождаемый подвижным контактом и маслом, вытекающим через зазоры, и объем, образующийся за счет сжатия воздушного буфера. Эта стадия работы присуща большинству дугогасительных устройств до начала открытия дутьевой щели.

Расчеты давления в этом режиме приведены в [27.11 и 27.19].

Режим газового дутья

В этом режиме газ, образующийся в камере, частично вытекает через дутьевую щель, частично занимает объем, освобождаемый контактом и маслом, вытекающим через зазоры.

Поскольку давление в камере значительно выше атмосферного, то скорость течения газа в дутьевой щели достигает критического значения $v_{г, \text{крит}}$.

Расчет ведется по методике, рассмотренной в [27.11] и [27.19].

27.3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАПЯЖЕНИЯ НА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕ

Основные обозначения

$S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность генератора, трансформатора, кВ·А;

$U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение элемента схемы (генератора, трансформатора, реактора и т. д.), кВ;

x — реактивное сопротивление в процентах, отнесенное к номинальным данным, %;

C — полная емкость обмотки фазы на землю, Ф;

C' — эквивалентная емкость схемы замещения, Ф;

L — индуктивность обмотки генератора, реактора, Гн;

L' — эквивалентная индуктивность, Гн;

L_0 — удельная индуктивность 1 км, Гн/км;

C_0 — удельная емкость 1 км, Ф/км.

Восстанавливающееся напряжение для схем с сосредоточенными и распределенными параметрами

Расчет производится для наиболее трудного для выключателя случая — рассматривается процесс восстановления напряжения на полюсе выключателя, отключившемся первым при трехфазном коротком замыкании (нуль заземлен в одной точке — в точке питания или в месте короткого замыкания).

Операторное выражение восстанавливающегося напряжения

$$E(p) = I_K(p) Z(p),$$

где $I_K(p)$ — операторное выражение отключаемого тока (когда сопротивление генераторов мало по сравнению с сопротивлением остальной части цепи короткого замыкания и гашение дуги происходит при естественном переходе тока через нуль, $I_K(p) = I_{\text{отк.м}} \omega/p$; $\omega = 2\pi f$; $f = 50$ Гц; $Z(p)$ — операторное выражение сопротивления цепи относительно контактов полюса, отключившегося первым.

По известной $E(p)$ при помощи формул § 4.4 находим $u(t)$.

Одночастотные цепи

Для одночастотного контура (рис. 27.36) периодический процесс восстановления напряжения описывается уравнением

$$u = U_0 (1 - e^{\alpha t} \cos \omega_0 t),$$

где U_0 — мгновенное значение напряжения промышленной частоты на контактах полюса при

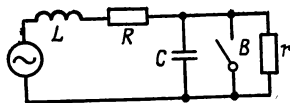


Рис. 27.36. Одночастотный контур

прохождении тока через нуль; α — коэффициент затухания, равный $-\frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right)$;

L — эквивалентная индуктивность отключаемой цепи, Гн; R — активное сопротивление цепи, Ом; C — эквивалентная емкость, Ф; r — сопротивление резистора, шунтирующего контакты (остаточное сопротивление дуги, сопротивление

делителей, низкоомные шунты) Ом; ω_0 — угловая частота контура, равная:

$$\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right)^2}.$$

В случае контура без потерь ($r = \infty$, $R = 0$) уравнение имеет вид

$$u = U_0 \left(1 - \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t \right) = U_0 (1 - \cos \omega_0' t),$$

где ω_0' — угловая собственная частота контура без потерь.

Напряжение

$$U_0 = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}} \sqrt{2} k_{\text{п.г}} \sin \varphi_K,$$

где φ_K — угол сдвига фаз между ЭДС и током; обычно $\varphi_K = 90^\circ$; $k_{\text{п.г}}$ учитывает схему короткого замыкания и для полюса выключателя, отключающегося первым, имеет значение 1,3 для систем с заземленной нейтралью.

Следует заметить, что r и R в реальных контурах не оказывают заметного влияния на ω_0 и значительно сказываются на коэффициенте затухания. Коэффициент превышения амплитуды (коэффициент пика)

$$K_A = \frac{U_m}{U_0} = 1 + e^{\alpha \pi / \omega_0}$$

имеет наибольшее значение, равное 2 (при $\alpha = 0$).

Средняя скорость восстановления напряжения, кВ/мкс,

$$\frac{du}{dt_{\text{ср}}} = \frac{U_0}{T_0/4} = 4U_0 f_0 \cdot 10^{-6}; \quad f_0 = \omega_0 / 2\pi.$$

С учетом затухания

$$\frac{du}{dt_{\text{ср}}} = 2U_0 f_0 K_A \cdot 10^{-6}.$$

Если $\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 > \frac{1}{LC}$, то коле-

бательный процесс переходит в аperiodический. Обычно это происходит при шунтировании полюса резистором с малым сопротивлением r (низкоомный шунт). В этом случае практически в схеме рис. 27.36 приходится учитывать только L и r . Восстанавливающееся напряжение описывается уравнением

$$u = U_0 (1 - e^{-t/T}); \quad T = L/r.$$

Наибольшая скорость восстановления напряжения

$$\frac{du}{dt_{t=0}} = U_0 \frac{r}{L}.$$

Средняя скорость восстановления напряжения за время $t = T$

$$\frac{du}{dt_{\text{ср}}} = 0,636 U_0 \frac{r}{L}.$$

Двухчастотные цепи

Если короткое замыкание произошло за реактором или трансформатором, то схема замещения содержит два контура.

Первый определяется параметрами источника (генератора, системы), второй — реактором или трансформатором. На рис. 27.37 дана расчетная схема с двумя независимыми (автономными) контурами.

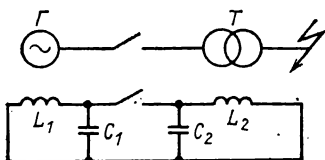


Рис. 27.37. Двухчастотная схема с независимыми контурами

Для цепей без затухания восстанавливающееся напряжение описывается уравнением

$$u = U_{01} (1 - \cos \omega_{01} t) + U_{02} (1 - \cos \omega_{02} t),$$

где

$$\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}; \quad \omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}};$$

$$U_{01} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} U_0; \quad U_{02} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} U_0.$$

Средняя скорость восстановления напряжения

$$\frac{du}{dt_{cp}} = 4 (f_{01} U_{01} + f_{02} U_{02}) \cdot 10^{-6},$$

где $f_{01} = \omega_{01}/2\pi$; $f_{02} = \omega_{02}/2\pi$.

Восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя u_b и на контурах u_1 и u_2 изображено на рис. 27.38.

В случае связанных контуров восстанавливающееся напряжение описывается уравнением

$$u = U_0 (1 - A_1 \cos \omega_1 t - A_2 \cos \omega_2 t),$$

где A_1 и A_2 — относительные амплитуды; ω_1 и ω_2 — собственные частоты с учетом взаимного влияния. Эти величины определяются путем

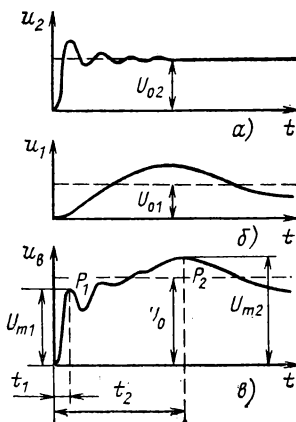


Рис. 27.38. Восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя (в) и его компоненты (а и б)

решения задачи операторным методом. Наибольшая скорость восстановления напряжения U_{m1}/t_1 . Положим, что ω_1 — угловая частота низкочастотной составляющей, а ω_2 — высокочастотной.

Если $A_2 \ll 0,1 A_1$, то высокочастотной составляющей можно пренебречь. Если соблюдаются условия

$$\Delta = \frac{A_1 \left(1 - \cos \frac{\omega_1}{\omega_2} \pi\right)}{2A_2} \ll 0,1;$$

$$\delta = \frac{A_1 \left(1 - \cos \frac{\omega_1}{\omega_2} 3\pi\right)}{2A_2} -$$

$$- \frac{A_1 \left(1 - \cos \frac{\omega_1}{\omega_2} \pi\right)}{2A_2} \ll 0,3,$$

то можно пренебречь низкочастотной составляющей и считать процесс восстановления напряжения одночастотным.

Для учета затухания высокочастотных составляющих можно воспользоваться множителем $e^{-0,051 \omega_k t}$:

$$u = U_0 (1 - A_1 e^{-0,051 \omega_1 t} \cos \omega_1 t - A_2 e^{-0,051 \omega_2 t} \cos \omega_2 t),$$

и в общем случае

$$u = U_0 \left(1 - \sum_{k=1}^n A_k e^{-0,051 \omega_k t} \cos \omega_k t\right).$$

Если реальная схема содержит элементы с распределенными постоянными в виде кабельных или воздушных линий, то до прихода волны, отраженной от противоположного конца линии, принимается, что в схеме замещения действует активное сопротивление, равное волновому (для линии без искажения).

Для рис. 27.39

$$Z(p) = \frac{pLR}{pL + RLCp^2 + R};$$

$$R = Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}};$$

$$u = U_0 (1 + A_1 e^{\omega_1 t} + A_2 e^{\omega_2 t});$$

$$\omega_1 = -\frac{1}{2RC} - \sqrt{\frac{1}{4R^2 C^2} - \frac{1}{LC}};$$

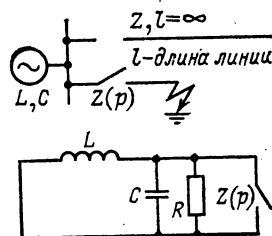


Рис. 27.39. Схема замещения при наличии линии бесконечной длины

$$A_1 = \frac{1}{\omega_1 LC \left(2\omega_1 + \frac{1}{LC} \right)};$$

$$\omega_2 = -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{4R^2 C^2} - \frac{1}{LC}};$$

$$A_2 = \frac{1}{\omega_2 LC \left(2\omega_2 + \frac{1}{LC} \right)}.$$

После того как к месту установки выключателя подойдет волна, отраженная от конца линии, начнется отражение волны от сборных шин (L , C), при этом напряжение на шинах возрастает быстрее. Если длина воздушной линии более 30—55 км, то к моменту прихода отраженной волны пройдет около 300 мкс, при этом электрическая прочность промежутка достигает большого значения и подъем напряжения в результате отражения от сборных шин не опасен для выключателя.

Особенно тяжелые условия восстановления напряжения появляются при отключении не удаленного короткого замыкания, происшедшего на линии передачи, защищаемой данным выключателем, на удалении от него в пределах от нескольких сотен метров до нескольких километров. При этом ток отключения может быть близким к номинальному току отключения, а скорость восстановления напряжения получается высокой за счет колебаний

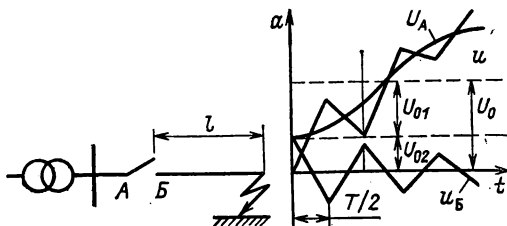


Рис. 27.40. Восстановление напряжения при неудаленном коротком замыкании

напряжения на отключенной линии небольшой длины (рис. 27.40).

Если принять, что волновое сопротивление воздушной линии 500 Ом, то при частоте $f = 50$ Гц скорость восстановления напряжения, В/мкс, в основном обусловленная колебанием линии, определяется уравнением

$$\frac{du}{dt} = 0,22I,$$

где I — ток короткого замыкания, А, определяемый по формуле

$$I = \frac{U_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\sqrt{3}(x_1 + x_2)},$$

где x_1 — сопротивление источника питания, Ом; x_2 — сопротивление отключаемой линии, Ом.

К неудаленным коротким замыканиям очень чувствительные воздушные выключатели, у которых в первый момент времени пос-

ле прохода тока через нуль электрическая прочность нарастает медленно. Маломасляные и масляные баковые выключатели малочувствительны к такого рода коротким замыканиям, так как электрическая прочность промежутка после нулевого значения тока нарастает быстрее, чем у воздушных выключателей.

При составлении упрощенной схемы замещения кабель и воздушную линию, обтекаемые током короткого замыкания, можно представлять сосредоточенной емкостью $C = C_0 l$ (где C_0 — удельная емкость линии, Ф/км; l — длина линии, км) в случае, если их индуктивность $L = L_0 l$ (где L_0 — удельная индуктивность линии, Гн/км) не более 10 % общей индуктивности цепи короткого замыкания. В противном случае кабель и воздушная линия представляются П-образной схемой замещения.

Расчет постоянных и упрощение схемы замещения

Все параметры элементов схемы должны быть приведены к принимаемому за базисное (U_6) номинальному напряжению выключателя, для которого рассчитывается восстанавливающееся напряжение:

$$C_6 = C U_{\text{ном}}^2 / U_6^2; \quad L_6 = L U_6^2 / U_{\text{ном}}^2,$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение элемента схемы.

Индуктивность схемы замещения при расчете восстанавливающегося напряжения меньше индуктивности при промышленной частоте. Это различие в основном объясняется размагничивающим действием вихревых токов, наводимых в проводниках генератора или трансформатора высокочастотным потоком, возникающим при процессе восстановления напряжения. Обычно принимают поправочный коэффициент для генераторов 0,65, для трансформаторов 0,6, для реакторов 0,75.

Методика определения эквивалентных емкостей при переходе от схемы с распределенными параметрами к схеме с сосредоточенными параметрами

Составляется операторное уравнение проводимости относительно разомкнутых контактов, оно приравнивается нулю и определяются его корни. Эквивалентный контур с сосредоточенными параметрами имеет частоту первой гармоники реальной схемы и индуктивность, равную полной индуктивности реальной цепи:

$$\omega_{01} = \pi/2 \sqrt{LC}; \quad L = L_0 l; \quad C = C_0 l.$$

Для расчета она приводится к контуру с сосредоточенными параметрами (рис. 27.41, б)

$$\omega_{01} = 1/\sqrt{LC'}; \quad C' = 0,406C,$$

где C — полная емкость на землю.

Такой схемой замещения можно пользоваться для генератора, нуль которого заземлен или точка соединения фаз имеет нулевой

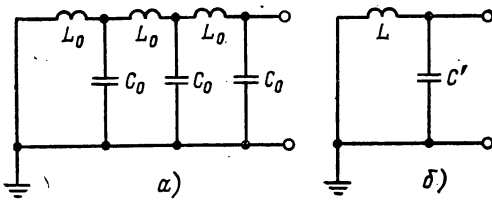


Рис. 27.41. Схема замещения для цепей с распределенными (а) и сосредоточенными (б) параметрами

потенциал. Цепь с распределенными постоянными в общем случае может присоединяться к другим цепям, и собственная частота всей системы может отличаться от частоты колебаний отдельно взятой цепи.

Если частота первой гармоники ω_{01} значительно выше частоты остальной части цепи, то $C' = C/3$.

б) Эквивалентная схема замещения генератора при отключении трехфазного короткого замыкания (рис. 27.42). Из условия равенства частоты первой гармоники схемы и частоты эквивалентного контура, имеющего индуктивность $1,5 L_T$, Гн, эквивалентная емкость $C' = 0,73 C$, Ф,

$$L_T = 0,65 \cdot 10 x_{\Gamma} \% U_{\text{ном}}^2 / 2\pi f S_{\text{ном}},$$

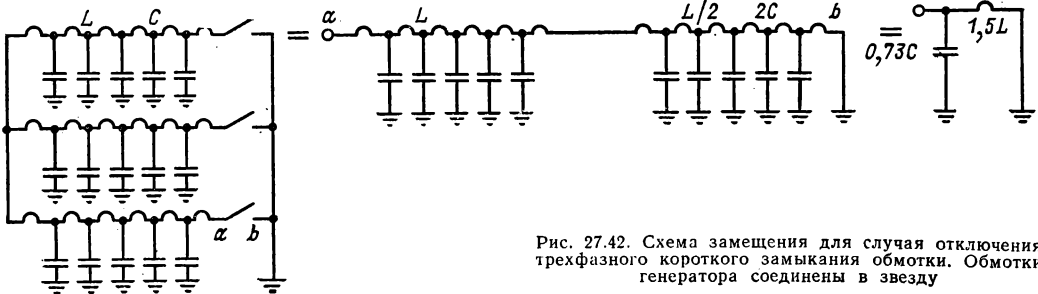


Рис. 27.42. Схема замещения для случая отключения трехфазного короткого замыкания обмотки. Обмотки генератора соединены в звезду

Таблица 27.9. Емкость на фазу оборудования

Объект	Емкость на фазу, пФ	Объект	Емкость на фазу, пФ
Генератор	$C = 0,5 \frac{\epsilon_r}{0,113} \frac{Z \mu l}{\Delta}$	Реактор масляный	500
	где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции паза; Z — общее число пазов статора; μ — периметр сечения меди в пазу, мм; Δ — толщина изоляции в пазу, мм; l — длина стали статора, м;	Выключатель баковый (на один вывод)	110—300
Трансформатор	$0,07 \frac{P_{\text{ном}}^{0,35} 10^3}{U_{\text{ном}}^{0,175}}$	Маломасляный выключатель (на один вывод)	25—100
	где $P_{\text{ном}}$ — трехфазная мощность, кВт·А; $U_{\text{ном}}$ — кВ	Воздушный выключатель (на один вывод)	20—80
Реактор бетонный	100—200; при монтаже в металлической ячейке емкость возрастает на 25 %	Трансформатор тока 10—20 кВ	100—200
		Трансформатор тока с изоляцией из кабельной бумаги, заполненный маслом	$C_{\Phi} = 310$ при $U_{\text{ном}} = 30$ кВ; $C_{\Phi} = 400$ при $U_{\text{ном}} = 110$ кВ; $C_{\Phi} = 575$ при $U_{\text{ном}} = 220$ кВ
		Трансформатор напряжения 6—110 кВ	400—500 при заземлении вторичной обмотки (большее число для 110 кВ)
		Разъединитель	100 на оба вывода
		Кабель	От $0,25 \cdot 10^6$ пФ/км (для 100 кВ) до $0,5 \cdot 10^6$ пФ/км (для 10 кВ)
		Емкость шин распределительных устройств	5—10 пФ/м

где $x_{\Gamma} \%$ — сверхпереходное сопротивление генератора.

в) Схема замещения при отключении трехфазного короткого замыкания на выводах генератора, обмотки которого соединены в треугольник (рис. 27.43). Эквивалентный одночастотный контур имеет

$$L' = 0,5 L_T; \quad C' = 0,812 C.$$

При упрощенных расчетах можно полагать, что индуктивность каждой фазы при 50 Гц равна L , Гн, при высокой частоте, а C' равна половине емкости каждой фазы (табл. 27.9).

г) В трансформаторах на процесс восстановления напряжения влияет емкость между первичной и вторичной обмотками. При упрощенных расчетах этой емкостью пренебрегают:

$$L_T = 0,6 \cdot 10 x_{\Gamma} \% U_{\text{ном}}^2 / 2\pi f S_{\text{ном}}.$$

д) Параметры схемы замещения одной фазы реактора

$$L = 0,75 \frac{10 U_{\text{ном}} x_{\Gamma} \%}{2\pi f \sqrt{3} I_{\text{ном}}}; \quad C' = C/2.$$

C берется из табл. 27.9.

е) Воздушные и кабельные линии (ориентировочные величины):

$$Z = \sqrt{L_0 / C_0}.$$

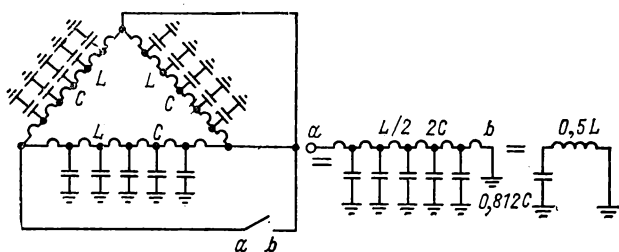


Рис. 27.43. Схема замещения для случая отключения трехфазного короткого замыкания. Обмотки генератора соединены в треугольник

Воздушные линии: $L_0 = 0,00125$ Гн/км; $C_0 = 0,009 \cdot 10^{-6}$ Ф/км; кабельные линии: $L_0 = 0,003$ Гн/км; C_0 — в табл. 27.9.

Расчет L_0 и C_0 см. в § 4.12.

При наличии нескольких параллельных линий

$$Z_{\text{рез}} = Z/N,$$

где N — число линий.

Нормирование параметров восстанавливающегося напряжения

В соответствии с ГОСТ 687-78 [27.14] в месте установки выключателя кривая переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) не должна пересекаться с нормированными кривыми ПВН.

В зависимости от номинального напряжения нормированные кривые ПВН могут определяться двумя и четырьмя параметрами.

1. ПВН, определяемое двумя параметрами, представлено на рис. 27.44. Кривая восстанавливающегося напряжения не должна выйти за пределы огибающих OB и BC , но должна один раз пересечь линию запаздывания. Линия запаздывания введена в связи с тем, что на сборных шинах всегда имеется сосредоточенная емкость, которая облегчает процесс ПВН в самом начале (кривая ПВН идет от точки O , один раз пересекает линию задержки и затем касается огибающей OBC). ПВН, определяемое двумя параметрами, используется при напряжении выключателя $U_{\text{ном}} \leq 35$ кВ.

На рис. 27.44

$$U_c = K_a K_{\text{п.г}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{\text{н.р}},$$

где U_c — амплитудное значение восстанавливающегося напряжения на полюсе, $K_{\text{п.г}} = 1,5$ — коэффициент главного гасящего полюса; K_a — коэффициент амплитуды, равный 1,4 для $I_0 =$

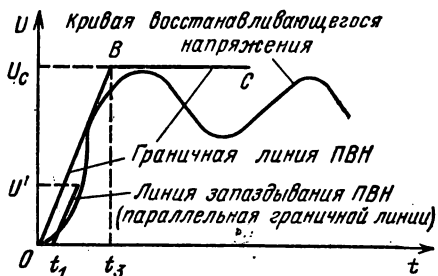


Рис. 27.44. ПВН, определяемое двумя параметрами

$= 100\%$ $I_{0,\text{ном}}$ и 1,5 для $I_0 = 60$ и 30% $I_{0,\text{ном}}$; $U_{\text{н.р}}$ — наибольшее рабочее напряжение, кВ; t_3 — время наступления напряжения U_c , оно зависит от тока отключения: при $I_0 = 100\%$ $I_{0,\text{ном}}$ принимают $t_{3,100} = 35; 50; 60; 75$ и 100 мкс соответственно для $U_{\text{ном}} = 6; 10; 15; 20$ и 35 кВ; при $I_0 = 60\%$ $I_{0,\text{ном}}$ принимают $t_{3,60} = 3/7 t_{3,100}$; при $I_0 = 30\%$ $I_{0,\text{ном}}$ принимают $t_{3,30} = 3/14 t_{3,100}$; $U' = U_c/3$ — конец линии запаздывания; $t_1 = 0,15 t_3$ — время запаздывания.

2. Для выключателей с $U_{\text{ном}} \geq 110$ кВ нормированная характеристика ПВН определяется четырьмя параметрами (рис. 27.45).

$$U_1 = K_{\text{п.г}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{\text{н.р}} = 1,3 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{\text{н.р}}; U_c = K_a U_1,$$

где K_a имеет те же значения, что и для $U_{\text{ном}} \leq 35$ кВ; t_1 зависит от тока отключения (при

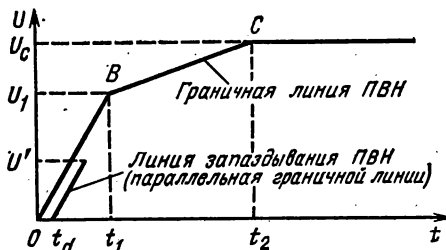


Рис. 27.45. ПВН, определяемое четырьмя параметрами

$I_0 = 100\%$ $I_{0,\text{ном}}$ принимают $t_{1,100}$ согласно табл. 27.10; $t_{1,60} = 0,5 t_{1,100}$ и $t_{1,30} = 0,2 t_{1,100}$ соответственно для $I_0 = 60$ и 30% $I_{0,\text{ном}}$; $U' = 0,5 U_1$; $t_d = 2; 4$ и 8 мкс соответственно для $I_{0,\text{ном}} = 100, 60$ и 30%).

Требования к характеристикам ПВН для выключателей, предназначенных для прямого присоединения к воздушным линиям на номинальное напряжение 110 кВ и выше, с $I_{0,\text{ном}} > 12,5$ кА для условия отключения удаленных коротких замыканий определяется параметрами линий (применительно к однофазному короткому замыканию) — волновым сопро-

Таблица 27.10. Значения параметра $t_{1,100}$, мкс

Номинальный ток отключения $I_{0,\text{ном}}$, кА	$U_{\text{н}}$					
	110	150	220	330	500	750
31,5	112	152	223	320	348	492
40	96	130	191	257	310	417
50	89	122	168	214	265	334
≥ 63	79	107	149	192	232	310

тивлением $Z=450$ Ом и коэффициентом пика $K_{п.в}=1,6$.

Скорость восстанавливающегося напряжения на первом подъеме определяется уравнением

$$\frac{du_B}{dt} = \frac{U_1}{t_1}.$$

27.4. НАЗНАЧЕНИЕ И ВЫБОР ШУНТИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Элементы, шунтирующие расходящиеся контакты и применяемые для облегчения гашения дуги, делятся на три группы.

Первая группа — делители большого сопротивления, включаемые параллельно каждому разрыву. Их назначение — обеспечить равномерное распределение напряжения как при промышленной частоте, так и при восстановлении напряжения. Эти делители могут быть как активными (омическими), так и реактивными (емкостными). В СССР получили наибольшее распространение активные делители напряжения (резисторы). Сопротивления резисторов имеют порядок несколько сотен килоом.

Чем меньше сопротивление шунтирующего резистора, тем более равномерно делится напряжение между разрывами.

Минимальное сопротивление шунта определяется способностью отделителя гасить активный ток делителя (обычно ток не выше 1 А для открытого отделителя).

В масляных выключателях делители применяются для равномерной нагрузки дугогасительных устройств в баковых выключателях, имеющих две камеры на полюс. Сопротивление шунтирующего резистора, обеспечивающего равномерное распределение напряжения, составляет 100—200 кОм на камеру для выключателей 110—220 кВ.

В настоящее время созданы малогабаритные керамические конденсаторы, которые широко применяются для выравнивания напряжения по разрывам в воздушных выключателях.

Вторая группа — резисторы среднего сопротивления (порядка нескольких тысяч ом). Они обеспечивают равномерную нагрузку всех разрывов, снижают перенапряжения при отключении как емкостного, так и малого индуктивного тока. Эти резисторы широко применяются в масляных баковых выключателях, предназначенных для отключения токов длинных линий. Сопротивление шунтирующего резистора выбирается в зависимости от необходимого снижения перенапряжений. Оптимальным является соотношение $RC_{л}=0,01$ с (где $C_{л}$ — емкость отключаемой линии; R — сопротивление шунта на полюс).

В масляном выключателе гашение остаточного тока после отключения короткого замыкания происходит под маслом (ток около 60 А в выключателях на 110—220 кВ). В воздушных, очевидно, потребуется специальное дугогасительное устройство.

В связи с повышением номинального напряжения установок очень остро стоит вопрос о ограничении перенапряжений, возникающих

при включении холостых линий. Весьма эффективным средством является предвключаемый резистор. При включении линии в цепь сначала вспомогательным разрывом включается резистор и перенапряжения ограничиваются. Затем включается главный контакт, который шунтирует и вспомогательный разрыв, и резистор. Сопротивление таких резисторов 1—2 кОм.

Третья группа — резисторы малого сопротивления от единиц ом до нескольких сотен ом. Назначение — снижение скорости восстановления и максимальной амплитуды восстанавливающегося напряжения.

В настоящее время мощность отдельных источников (генераторов, трансформаторов) продолжает быстро расти, что приводит к увеличению скоростей восстановления напряжения. В связи с этим следует ожидать широкого применения шунтирующих резисторов малого сопротивления для воздушных выключателей. Процесс отключения при наличии шунта идет таким образом: размыкаются контакты первого промежутка, шунтированного резистором, при прохождении тока через нуль дуга гаснет. При

$$R_{ш} < \sqrt{L/C} / 2$$

процесс восстановления напряжения аperiodический, скорость восстановления напряжения снижается до нескольких десятков В/мкс и уменьшается пик восстанавливающегося напряжения промышленной частоты.

Сопротивление $R_{ш}$ должно быть таким, чтобы шунтированный разрыв отключал все токи при скорости восстановления напряжения, получающейся при данном

$$R_{ш} < \sqrt{L/C} / 2.$$

Для эффективной работы шунтирующего резистора его индуктивность должна быть небольшой (примерно 40 мкГн). Шунтирующие резисторы малого сопротивления выполняются из нихромовой ленты. Технология изготовления металлического резистора очень сложна, требуется дефицитная нихромовая лента. Поэтому такие резисторы применяются довольно редко.

В настоящее время для резисторов начинают применять композиционный резистивный материал — бетэл (бетон электропроводящий). Этот материал имеет нелинейную вольт-амперную характеристику.

$$U = R_0 I^\alpha,$$

где U — напряжение, кВ; R_0 — начальное сопротивление резистора (без тока), Ом; I — ток, кА; α — показатель нелинейности, равный 0,8—0,95.

Бетэловый резистор представляет собой цилиндр диаметром 400 мм, состоящий из отдельных дисков. Такой резистор прост по конструкции, имеет малую индуктивность (резистор сопротивлением 180 Ом имеет индуктивность 40 мкГн), дешев в производстве и надежен в эксплуатации.

27.5. ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, ВЫПУСКАЕМЫЕ В СССР

Масляные выключатели

Выключатели серии ВМГ-10 (рис. 27.46) маломасляные имеют металлический бак, который для выключателей на номинальный ток 1000 А выполнен из латуни, а для выключателей на номинальный ток 630 А — из стали и имеет продольный немагнитный шов. Выключатель имеет съемное дно с неподвижным ро-

зеточным контактом. Выключатели на 630 и 1000 А имеют одинаковые токоведущие стержни и розеточные контакты и отличаются размерами колодки и количеством гибких связей (одна на полюс 630 А и две на 1000 А). Применены рычаги из стеклопластика вместо фарфоровых тяг. Выключатели ВМП-10 предназначены для работы с пружинным приводом типа ППВ-10.

Выключатели серии ВМПЭ-10 (рис. 27.47) (маломасляные, подвесные, со встроенным электромагнитным проводом) применяются в комплектных распределительных устройствах

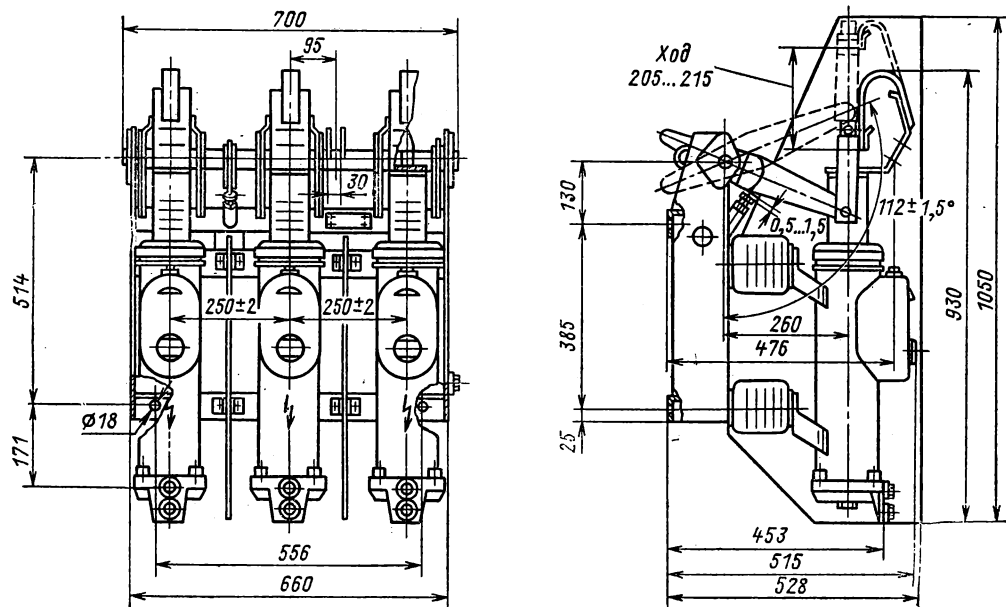


Рис. 27.46. Выключатель ВМГ-10

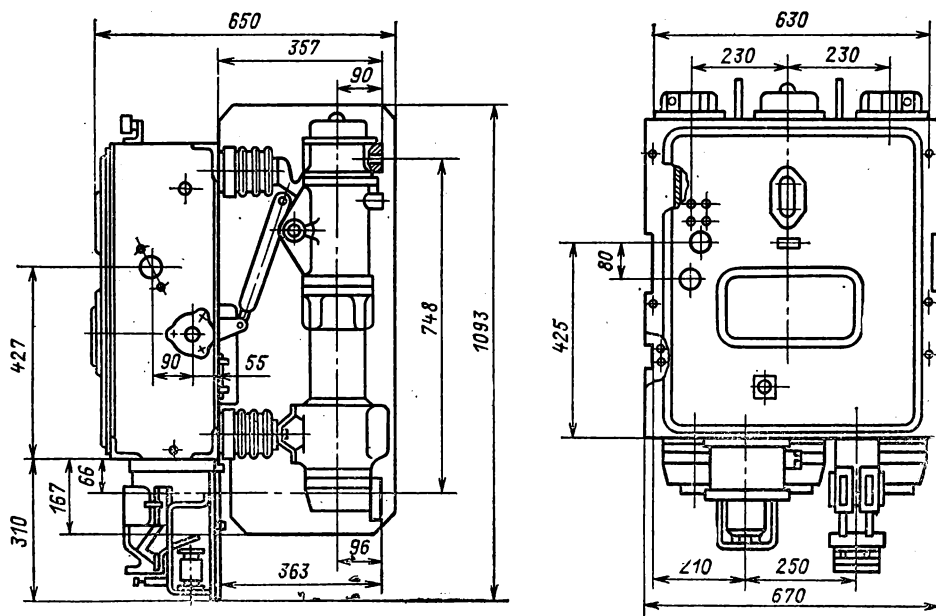


Рис. 27.47. Выключатель ВМП-10

(КРУ). Выключатель имеет дугогасительную камеру продольно-поперечного дутья. Изоляция между нижним токоведущим фланцем, на котором установлен неподвижный розеточный контакт, и верхним токоведущим фланцем осуществляется стеклоэпоксидным цилиндром. Подвижный контакт — стержневой. Наконечники стержня и сегментов розеточного контакта облицованы дугостойкой металлокерамикой. Токосъем со стержня подвижного контакта на верхний токоведущий фланец — роликовый. Места контактирования подвижного и неподвижного контактов покрываются серебром.

Выключатели серии ВММ-10 (рис. 27.48) — трехполюсные маломасляные со встроенным пружинным приводом. Каждый полюс крепится к раме при помощи фланцев и связан изоляционной тягой с валом выключателя. Полюс — стеклоэпоксидный цилиндр, внутри которого крепится стойка со съёмным наконечником подвижного контакта. Верхним выводным контактом полюса служит верхняя плоскость стойки. В нижнюю часть цилиндра ввинчено основание с розеточным контактом, над которым находится дугогасительная камера.

Выключатели серии ВК-10 (см. рис. 27.5 и 27.49) — колонкового типа, предназначены для встраивания в КРУ там, где не требуется частая коммутация. Выключатели имеют встроенный пружинный привод с автоматическим подзадом пружин.

Выключатели серии МГГ (рис. 27.50) (выключатель масляный генераторный) — маломасляные на большие номинальные токи, име-

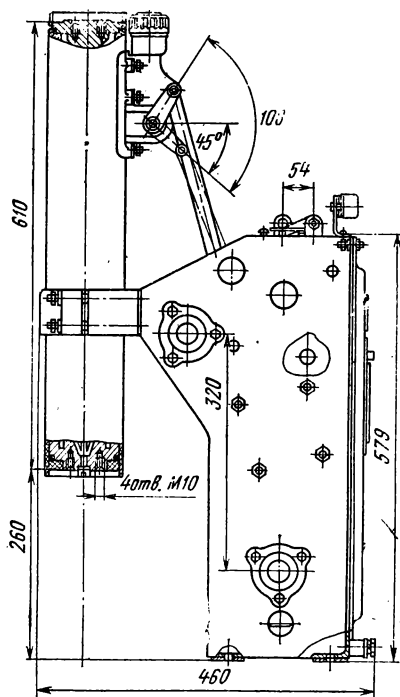


Рис. 27.48. Выключатель ВММ-10

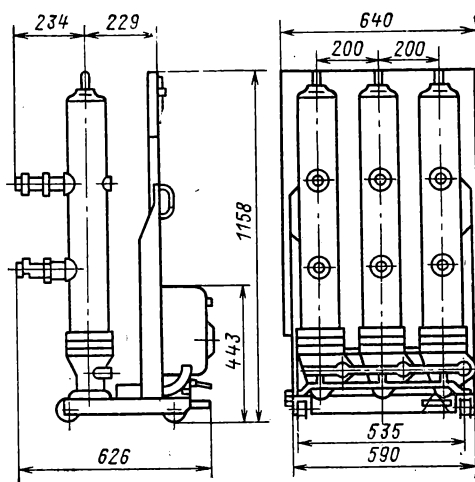


Рис. 27.49. Выключатель ВК-10 на 630 и 100 А

ют два разрыва на полюс и два параллельных токоведущих контура: главный и дугогасительный. При включенном положении выключателя оба контура работают параллельно, при этом преобладающая часть тока проходит через главный контур, имеющий значительно меньшее сопротивление, чем дугогасительный. При отключении выключателя контакты главного контура размыкаются раньше контактов дугогасительного.

Подвижные контакты главного и дугогасительного контуров каждого полюса выключателя смонтированы на общей траверсе. Неподвижные контакты главного контура смонтированы на крышках баков, а неподвижные контакты дугогасительного контура (розеточные контакты) — внутри этих баков. Полюсы выключателя устанавливаются на общей раме, внутри которой укреплены блок отключающих пружин, пружинные и масляные буферы. Дугогасительным устройством является камера продольно-поперечного дутья.

Выключатели серии ВМТ (рис. 27.51). Конструкция выключателя проста и надежна, малые массы и габариты позволяют устанавливать его на облегченных фундаментах, доступ к контролируемым элементам механизмов, к контактам и камерам легкий и объем работ при их замене минимальный; с применением автономного пружинного привода не требуется мощного источника питания; коммутационные характеристики во всем диапазоне отключаемых токов, в том числе и токов ненагруженных линий, стабильные; выключатель может эксплуатироваться в различных климатических зонах, в том числе и в районах Крайнего Севера.

Выключатель относится к электрическим коммутационным аппаратам высокого напряжения, в которых гасящей средой является изоляционное масло.

Выключатель трехполюсного исполнения с установкой полюсов на общем сварном основании (раме) управляется пружинным приво-

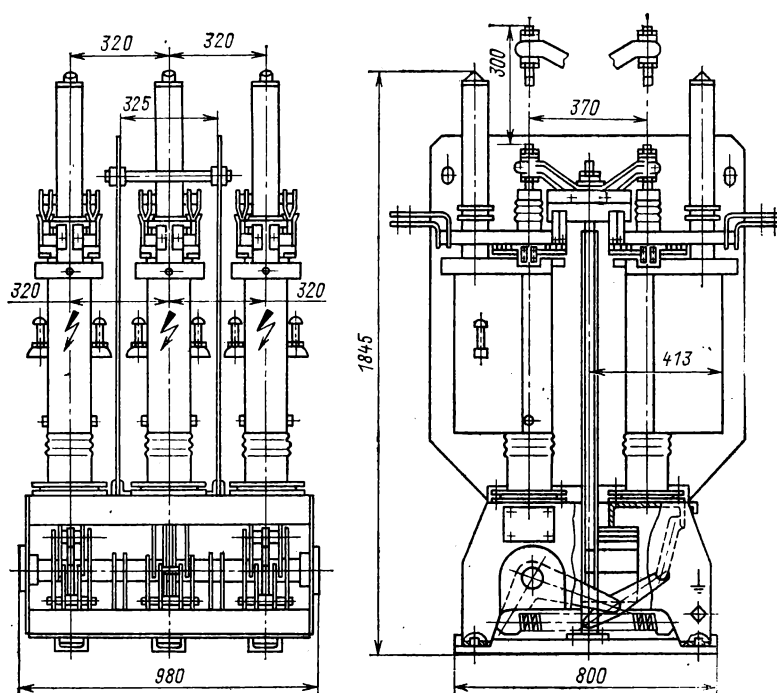


Рис. 27.50. Выключатель МГГ-10-45

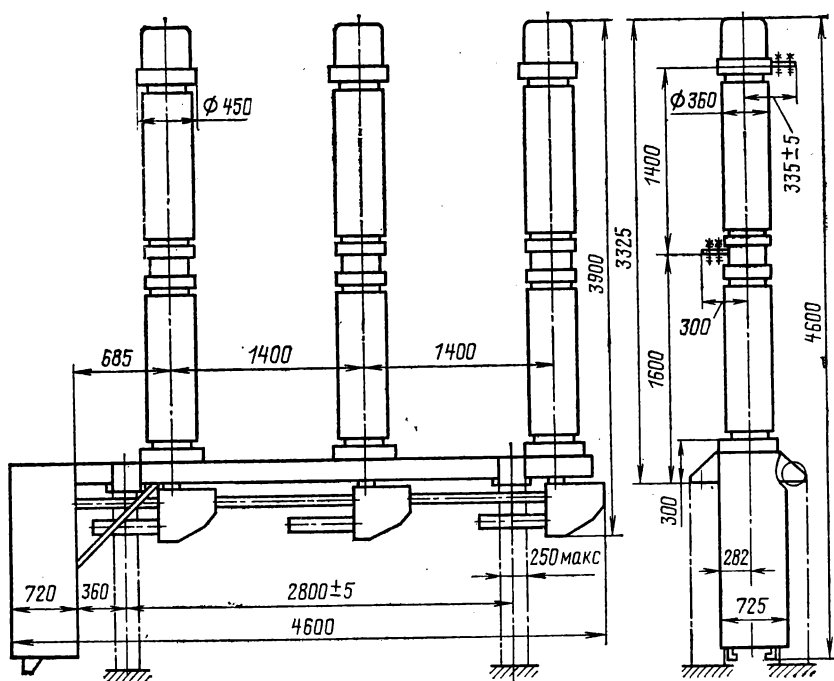


Рис. 27.51. Выключатель ВМТ-110

дом. В раме имеются лапы с отверстиями для крепления к фундаментным стойкам. Рама и привод снабжены специальными болтами для присоединения заземляющих шин,

Полос выключателя представляет собой маслonaполненную колонну, состоящую из опорного изолятора, дугогасительного устройства с токовыми выводами, механизма управ-

ления и электронагревательных устройств. Одноразрывное дугогасительное устройство состоит из токопровода, связанного с неподвижным контактом, на основании которого закреплена дугогасительная камера встречно-поперечного дутья, полого фарфорового изолятора, закрытого сверху колпаком, и токоотвода с подвижным контактом.

Для увеличения срока службы дугогасительного устройства элементы камеры, расположенные в зоне горения электрической дуги, выполнены из дугостойкого электроизоляционного материала, контакты облицованы дугостойкой металлокерамикой.

Колпак снабжен манометром для контроля избыточного давления в дугогасительном устройстве, устройством для заполнения сжатым газом и его выпуска, выпускающим автоматическим клапаном, поддерживающим избыточное давление на требуемом уровне, и указателем уровня трансформаторного масла.

Внутри опорного изолятора размещены изоляционные тяги, связывающие подвижный контакт с механизмом управления. В конструкцию механизма управления подвижным контактом положен принцип передачи движения посредством гибких звеньев — стальных тросов.

Механизм размещен в корпусе, разделенном на два отсека вертикальной перегородкой, через которую проходит главный вал. В наружном отсеке размещено полиспастовое устройство, во внутреннем — элементы механизма, передающие движение от главного вала к подвижному контакту. Этот отсек сообщается с полостью опорного изолятора, заполнен маслом и снабжен маслоспускным краном.

Полюсы выключателя снабжены электронагревательными устройствами. Электрическая схема соединения электронагревателей обеспечивает возможность включения их двумя ступенями в зависимости от марки залитого в выключатель трансформаторного масла и температуры окружающего воздуха.

Надежность работы выключателя без повторных пробоев в режиме отключения емкостных токов ненагруженных линий электропередачи обеспечивается герметизацией маслонаполненных колонн, находящихся под постоянным избыточным давлением газа (воздуха или азота с относительной влажностью не более 25 %, предпочтительнее азота). Избыточное давление также поддерживает высокую электрическую прочность межконтактного промежутка, повышает износостойкость контактов, способствует сохранению высокого уровня внутренней изоляции вне зависимости от внешних условий. Оно создается сжатым газом, который подается от баллонов или компрессора, перед вводом выключателя в эксплуатацию и сохраняется без пополнения вплоть до очередной ревизии.

Технические данные маломасляных выключателей приведены в табл. 27.11.

Выключатели серий МКП, «Урал» (У) и С (баковые масляные выключатели) на напряжение 35 кВ выпускаются в виде трехполюсного аппарата, каждый полюс которого собран на отдельной крышке и помещен в отдельный бак овальной формы. Все полюсы выключателя механически соединены и управляются общим приводом. Выключатель и привод смонтированы на общем сварном каркасе, к которому крепится барабан с тросом для подъема и

Т а б л и ц а 27.11. Маломасляные выключатели переменного тока

Тип выключателя ¹	Предельный ток, кА		4-секундная термическая стойкость, кА	Собственное время включения с приводом, с	Время включения, с	Собственное время отключения с приводом, с	Минимальная пауза при АПВ, с	Масса		Тип привода	Цена, руб.
	действующий	амплитуда						выключателя с маслом	масла		
ВММ-10-400/630-10	10	25	10 (3с)	0,2	0,105	0,085	0,5	93,5	3,5	Встроенный пружинный	635
ВМПЭ-10-630/1000/1600-20	20	52	20 (8с)	0,3	0,095	0,7	0,5	225,5	5,5	Встроенный электромагнитный	625
ВМПЭ-10-630/1000/1600-31,5	31,5	80	31,5	0,3 0,075	0,12 0,07	0,09 0,05	0,5 0,5	408	8 12	Встроенный пружинный	1215 980— 1050
ВМПЭ-10-3150-31,5	31,5	80	31,5					174— 204			
ВК-10-630/1000/1600-31,5	31,5	80	31,5	0,3	0,095	0,07	0,3	192— 220	12	Встроенный электромагнитный	
ВК-10-20/630/1000/1600	20	52	20 (3с)								
ВКЭ-10-31,5/630/1000/1600	31,5	80	31,5 (3с)	0,3	0,11— 0,14	0,09— 0,12	0,5	134,5 144,5	4,5	ПЭ-11, ПП-67, ППВ-10 ПЭ-21	1765— 2345 9000
ВПМ-10-20/630/1000	20	52	20								
МГГ-10-3200/4000/5000—45	45	120	45	0,4	0,15	0,12	—	1095— 1200	—		
ВМТ-110Б-20/1000	20	52	20 (3с)	0,15	0,08	0,05	0,3	2260	260	Встроенный пружинный	
ВМТ-220Б-20/1000	20	52	20 (3с)	0,15	0,08	0,05	0,3	7140	840	То же	

¹ В обозначении типа содержатся номинальное напряжение (кВ), номинальный ток отключения (кА), номинальный ток (А).

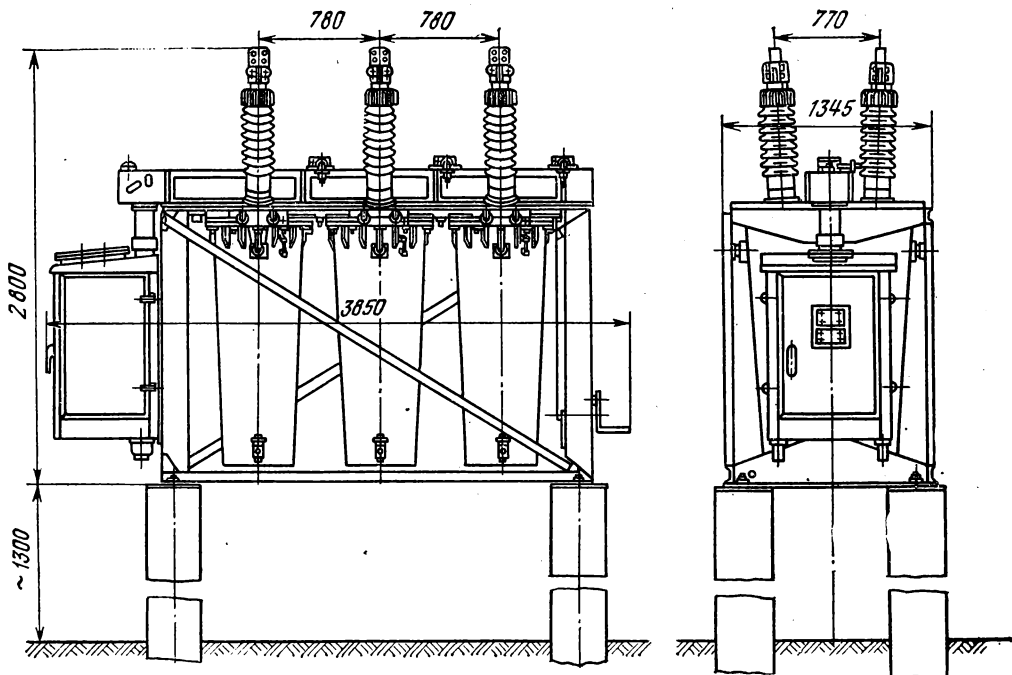


Рис. 27.52. Выключатель С-35-3200-50

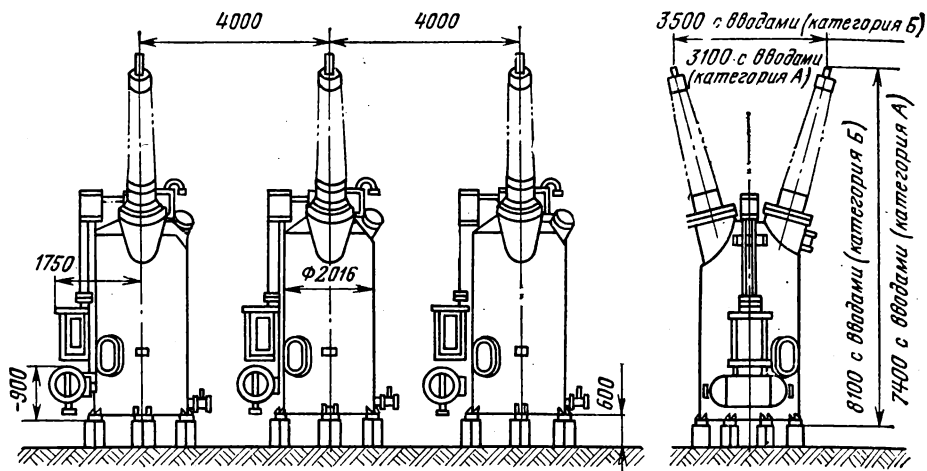


Рис. 27.53. Выключатель У-220-2000-40

опускания баков с маслом (рис. 27.52). Выключатель имеет два разрыва на полюс. Подвижные контакты в виде стержней устанавливаются на траверсе, связанной через изоляционную штангу с приводным механизмом на крышке выключателя.

Выключатели на 110 и 220 кВ выпускаются в виде отдельных полюсов (баков) (рис. 27.53). Дугогасительное устройство выключателя представляет собой камеру с многократными последовательными разрывами, шунтированными сопротивлениями. Масло в баковых выключателях служит как дугогасящей средой, так и изоляцией от заземленных частей и между разомкнутыми контактами. Все вы-

ключатели имеют встроенные трансформаторы тока от двух до четырех на каждый полюс.

Технические данные масляных баковых выключателей приведены в табл. 27.12.

Выключатели нагрузки

Выключатели нагрузки ВН-10 внутренней установки предназначены для включения отдельных участков электрической цепи высокого напряжения при токах нагрузки до нескольких сотен ампер и при отсутствии тока, для защиты электрических сетей от токов короткого замыкания. В этом последнем случае к раме

Т а б л и ц а 27.12. Масляные баковые выключатели переменного тока

Тип выключателя ¹	Предельный сквозной ток, кА		4-секундная термическая стойкость, кА	Собственное время включения с приводом, с	Время отключения, с	Собственное время отключения с приводом, с	Минимальная пауза при АПВ, с	Масса, кг		Тип привода	Цена, руб.
	действующий	амплитудный						выключателя с маслом	масла		
С-35М-630-10	10	26	10	0,35—0,4	0,08—0,15	0,05—0,12	0,5	1040	230	ШПЭ-12 ПП-67	1500—1950
ВТ-35-800-12,5	12,5	31	12,5	0,34	0,09—0,15	0,06—0,12	0,5	1050	300	ШПЭ-11 ПП-67	1300—1540
ВТД-35-800-12,5								1291			
МКП-35-1000-25	25	64	25	0,4	0,08	0,05	0,8	3120	800	ШПЭ-31	3200
С-35-3200/2000-50Б	50	127	50	0,7	0,08	0,055	0,7	5180	1040	ШПЭ-38	14 200
МКП-110Б-1000/630-20	20	52	20 (3с)	0,6	0,08	0,05	0,8	16 400	8000	ШПЭ-33	10 600
У-110-2000-40	40	102	40 (3с)	0,8	0,08	0,06	0,9	18 400	8000	ШПЭ-44	15 800
У-110-2000-50	50	135	50 (3с)	0,3		0,05	0,7	15 950	5700	ШП-46	22 600
У-220-1000/2000-25	25	64	25 (3с)	0,45—0,9	0,08	0,05	0,9	51 500	27 000	ШПП-45 ШП-46	38 000
У-220-2000-40	40	102	40 (3с)	0,45—0,9	0,08	0,045	0,7—1,1	52 500	27 000	ШПВ-46 ШПЭ-46	56 000

¹ В обозначении типа даны номинальное напряжение (кВ), номинальный ток (А), номинальный ток отключения (А).

выключателей последовательно присоединяются предохранители типа ПК. Выключатели нагрузки без предохранителей применяются в маломощных сетях, например сельских, в виде самостоятельного коммутационного аппарата. Выключатели нагрузки допускают коммутирование батарей конденсаторов мощностью до 400 квар.

Для ручного управления выключателями нагрузки применяется привод ПР-17.

Размыкание дугогасительных контактов происходит в камерах, выполненных из пластмассы и имеющих вкладыши из органического стекла, которые позволяют отключать без замены вкладышей 300 раз ток 50 А, 200 раз ток 100 А и 3 раза ток 400 А.

При включении выключателя сначала замыкаются дугогасительные контакты, затем главные, при отключении — наоборот. В отключенном положении подвижный дугогаси-

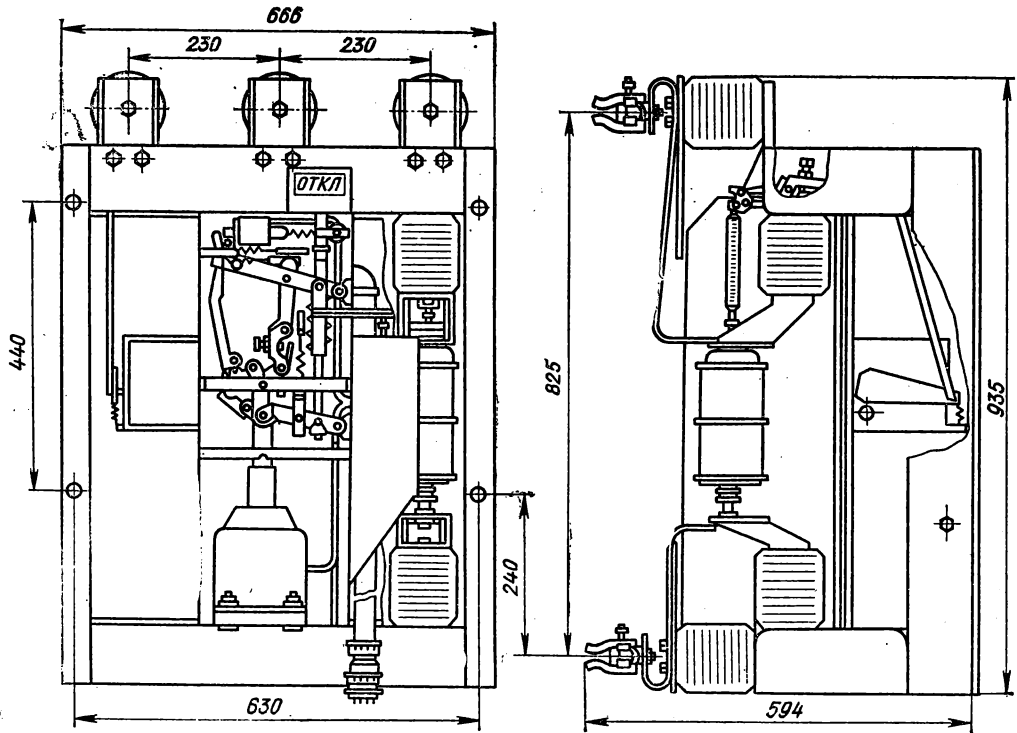


Рис. 27.54. Выключатель ВНП-10/320-2

тельный контакт образует видимый воздушный зазор с дугогасительной камерой. Выключатели нагрузки могут снабжаться стационарными заземляющими ножами с блокировкой от неправильного включения.

Электрическая дуга, возникшая между дугогасительными контактами, гасится газами, образующимися из органического стекла вкладыша при воздействии высокой температуры дуги.

В качестве выключателей нагрузки также применяются вакуумные выключатели типа ВВП-10/320-2, выполненные на основе вакуумной дугогасительной камеры КДВ-21 (рис. 27.54).

Воздушные выключатели

ВВШ — воздушные выключатели с закрытым (воздухонаполненным в отключенном положении) отделителем. Выключатель выполнен в виде отдельных полюсов. Управление выключателем может быть полюсным или трехполюсным. Гасительные камеры выключателей состоят из нескольких одинаковых вертикально расположенных элементов. Каждый элемент содержит два полых торцевых контакта, из которых один (подвижный) приводится в движение поршневым механизмом. Каждый элемент гасительной камеры шунтирован низкоомным сопротивлением, состоящим из одинаковых блоков (буква Ш в обозначении типа выключателя). Сопротивление каждого блока 150 Ом. Отделители выключателя, так же как и камеры, состоят из нескольких одинаковых вертикально расположенных элементов.

ВВБ — воздушные выключатели с металлическими гасительными камерами. В обозначении типа вместо буквы Б и после нее могут стоять буквы У — усиленный по скорости восстанавливающегося напряжения, М — малогабаритный, Д — с повышенным давлением сжатого воздуха, П — для электротермических установок.

Выключатели имеют двухразрывные дугогасительные устройства одностороннего дутья. Камеры (резервуары) постоянно заполнены сжатым воздухом и находятся под высоким потенциалом. Напряжение подводится к камерам через эпоксидные вводы, защищенные снаружи фарфоровыми крышками (рис. 27.55).

Главные разрывы камер выключателей на 110 и 220 кВ шунтируются во включенном положении и в процессе отключения линейными резисторами 100 Ом. Вспомогательные разрывы служат для отключения тока, протекающего через шунтирующие резисторы после гашения дуг на главных разрывах. Делительные конденсаторы предназначены для выравнивания распределения напряжения по разрывам в отключенном положении выключателей.

При отключении сначала размыкаются главные контакты. Возникшие на них дуги гасятся потоком сжатого воздуха за 0,02 с. Примерно через 0,035 с после размыкания главных контактов размыкаются вспомогательные контакты. Время горения дуги на вспомогательных контактах не более 0,01 с. При включении первыми замыкаются главные контакты,

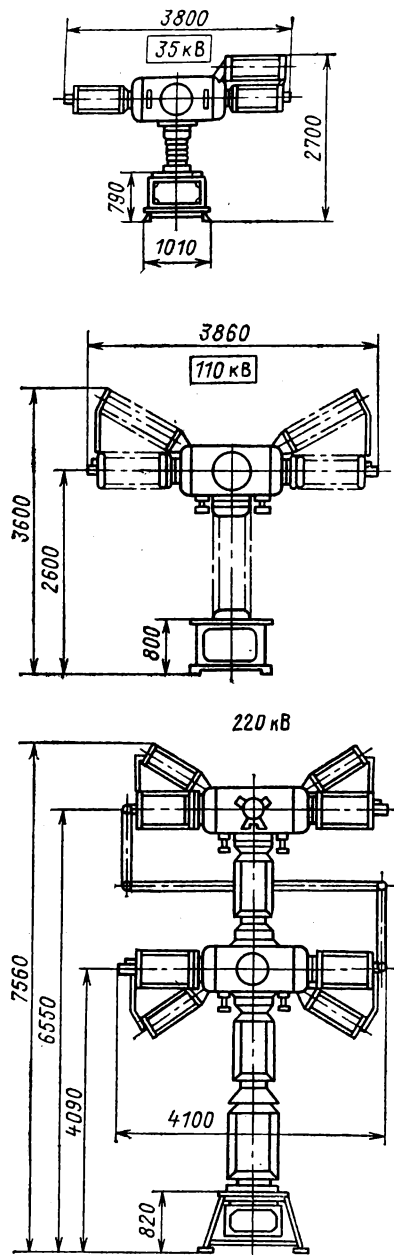


Рис. 27.55. Серия выключателей ВВБ

а затем (через 0,04—0,08 с) — вспомогательные.

Половина разрывов выключателей типа ВВУ-35 и ВВУ-110 шунтирована низкоомными резисторами. При отключении оба главных разрыва камеры этого выключателя размыкаются одновременно. После погасания дуги на разрыве, шунтированном резистором, другой разрыв отключает сопровождающий ток, ограниченный этим резистором.

Полюс выключателя на 35, 110 и 150 кВ состоит из одной металлической дугогасительной камеры, расположенной на опорной изоля-

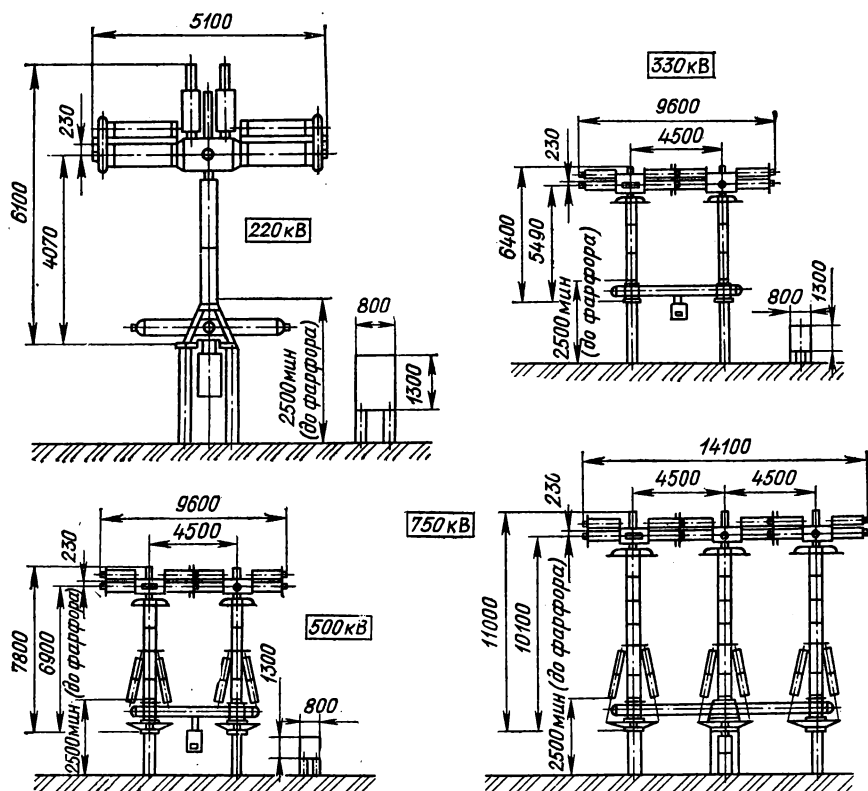


Рис. 27.56. Серия выключателей ВНВ

ции, шкафа управления с размещенными в нем элементами пневматического и электрического управления и устройством сигнализации положения выключателя.

Полюс выключателей на 220 кВ состоит из двух металлических дугогасительных камер, разделенных промежуточным изолятором и расположенных на опорной изоляции.

Полюсы выключателей на 330, 500 и 750 кВ состоят соответственно из двух, трех и четырех однотипных элементов, каждый из которых состоит из двух дугогасительных камер, разделенных промежуточным изолятором и расположенных на опорной изоляции, опорной рамы и шкафа управления. Шкафы управления и дугогасительные камеры унифицированы. Выключатели на 35, 110 и 150 и 220 кВ имеют по одному распределительному шкафу, в которых расположена аппаратура, связывающая три полюса выключателей в один общий агрегат. Элементы каждого полюса выключателей на 330, 500 и 750 кВ объединяются полюсными распределительными шкафами. Кроме того, для этих выключателей предусмотрен общий шкаф типа ШКС, связывающий электрически между собой полюсные шкафы. Камеры выключателей на 330, 500 и 750 кВ не имеют шунтирующих резисторов и вспомогательных контактов. Рисунок дает представление о развитии на основе базисного элемента серии выключателей до напряжения 750 кВ.

ВНВ — серия воздушных выключателей, основанная на блочном (модульном) принципе построения (рис. 27.56). Основной элемент вы-

ключателя — дугогасительный модуль; он постоянно заполнен сжатым воздухом и имеет контактную систему, образующую при отключении два разрыва. В процессе отключения контакты расходятся сначала на оптимальное для гашения дуги расстояние, а затем перемещаются в конечное положение. Выключатели этой серии практически полностью унифицированы, более экономичны по расходу сжатого воздуха, имеют большое быстродействие при коммутациях, стабильность механических характеристик и малую разновременность срабатывания элементов полюса за счет механической системы управления дугогасительными устройствами. Выключатели данной конструкции являются полностью взрывобезопасными в эксплуатации, так как под высоким давлением находятся не фарфоровые изоляторы, а прочные изоляционные цилиндры.

Выключатели на напряжение до 220 кВ соответствуют ГОСТ 687-78.

Технические данные приведены в табл. 27.13.

Электромагнитные выключатели

Технические данные электромагнитных выключателей приведены в табл. 27.14. Действие электромагнитных выключателей основано на гашении электрической дуги отключения в дугогасительной камере, содержащей пакет керамических пластин, в который дуга затягивается поперечным магнитным полем, возбуждаемым

Т а б л и ц а 27.13. Воздушные выключатели переменного тока

Тип	Номинальный ток, А	Предельный сквозной ток, кА		4-секундная термическая стойкость, кА	Номинальный ток отключения, кА	Время включения, с	Время отключения, с	Расход воздуха на отключение, л	Масса выключателя, кг	Число дугогасительных разрывов на полюс	Цена, руб.
		действующий	амплитудный								
ВНСТ-15	12 000	190	480	190	31,5	0,06	0,08	—	7500	2	—
ВВГ-20	12 500	160	410	160	160	0,1	0,15	—	9150	2	22 800
	20 000										
ВВП-35	1250	16	41	16	16	0,28	0,08	—	1200	1	4000
ВВ-35-20/1250	1250	20	52	20	20	0,28	0,08	—	1300	1	—
ВВУ-35	2000/3200	40	100	40	40	0,13	0,07	4000	7500	2	14 700
ВВП-110	630/1250	26	67	26	16	0,15	0,08	4500	7500	2	—
ВВУ-110	2000	42	102	40	40	0,20	0,08	8400	15 600	2	30 000
ВВВМ-110	2000	35	90	35	31,5	0,15	0,07	4500	7500	2	15 950
ВВВ-150	2000	35	90	31,5	25	0,15	0,07	4500	9600	2	—
ВВШ-150	2000	25	64	25	25	0,25	0,08	18 000	13 200	3	—
ВВВ-220	2000/3200	31,5	80	31,5	31,5	0,20	0,08	9000	15 600	4	35 000
ВВД-220	2000	31,5	80	31,5	31,5	0,24	0,08	9000	16 200	4	37 500
	3200	40	102	40	40			14 000			
ВНВ-220	2000	40	102	40	40	0,1	0,04	4200	12 000	4	—
ВВВ-330	2000	35	90	35,5	35,5	0,25	0,08	18 000	26 000	12	—
ВВД-330	3200	40	102	40	40	0,25	0,08	24 000	36 000	8	72 000
ВВД-330	2000	40	102	40	40	0,1	0,04	8400	22 600	—	85 000
ВВВ-500	2000	35,5	90	35,5	35,5	0,25	0,08	27 000	63 000	12	110 000
ВНВ-500	2000	63	—	63 (3с)	63	0,1	0,06	12 000	30 000	—	108 000
ВВВ-750	3200	40	102	40	40	0,11	0,06	42 000	90 000	16	150 000
ВНВ-750	3200	—	102	40	40	—	0,06	32 500	54 000	—	—
ВНВ-1150	4000	40	102	40	40	0,1	0,035	52 500	137 500	—	210 000
ВВВК-110	3200	50	127	50	50	—	0,06	—	—	2	—
ВВВК-220	3200	56	142	56	56	—	0,04	—	—	4	—
ВВВК-330	3200	40	102	40	40	—	0,04	—	—	8	—
ВВВК-500	2000	40	102	40	40	—	0,04	—	—	8	—
ВВВК-750	3200	40	102	40	40	—	0,04	—	—	8	—
ВВВК-1150	4000	40	102	40	40	—	0,04	—	—	12	—

током дуги. При отключении выключателя размыкаются сначала главные, а затем дугогасительные контакты. Возникающая при этом дуга под действием электродинамических сил токоведущего контура и тепловых конвекционных потоков выдувается вверх в дугогасительную камеру. Расширяясь, петля дуги приближается к медному рогу, расположенному над неподвижным контактом и касается его, при этом катушка электромагнита, создающего магнитное дутье, включается параллельно участку дуги между контактом и рогом. Шунтированная часть дуги гаснет, и через катушку начинает проходить полный ток отключаемой цепи. Второе основание дуги перебрасывается с подвижного дугогасительного контакта на другой рог, при этом последовательно в цепь дуги включается вторая катушка магнитного дутья, создается магнитное поле, взаимодействующее с

током дуги и вызывающее перемещение дуги в пакет керамических пластин, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Пластины снабжены вырезами, сужающимися сверху и смещенными в сторону от середины пластины. Попадая в пакет пластин, дуга приобретает зигзагообразную форму, интенсивно охлаждается и при переходе через нуль гаснет. При отключении малых токов (до 1000 А) для улучшения гашения дуги применяется устройство воздушного поддува. На рис. 27.57 показан выключатель серии ВЭ-10. У выключателей серии ВЭ-10 в зависимости от номинального тока и номинального отключаемого тока несколько меняется конструктивное исполнение. Выключатели различаются:

дугогасительными камерами (на номинальный ток отключения 20 кА камера имеет меньшие габаритные размеры и массу по сравнению

Т а б л и ц а 27.14. Технические данные электромагнитных выключателей

Тип выключателя	Предельный сквозной ток, кА		4-секундная термическая стойкость, кА	Собственное время отключения выключателя с приводом, с	Время отключения выключателя с приводом, с	Собственное время включения выключателя с приводом, с	Масса, кг	Цена, руб.
	действующий	амплитудный						
ВЭВ-6-630/16	16	41	16	0,06	0,08	—	245	1500
ВЭ-6-1600/2000/3200-40	40	128	40	0,06	0,075	0,075	574—606	—
ВЭС-6-1630/2000/3200-40	40	128	40	0,06	0,075	0,075	580—610	—
ВЭ-10-1250/1600/2500/3600-20	20	51	20	0,06	0,075	0,075	522—565	3600—3900
ВЭ-10-1600/2500/3150-40	40	100	40 (3с)	0,06	0,08	0,08	650—685	4000
ВЭМ-10Э-1000/1250-20	20	52	20	0,05	0,07	0,25	599—621	600

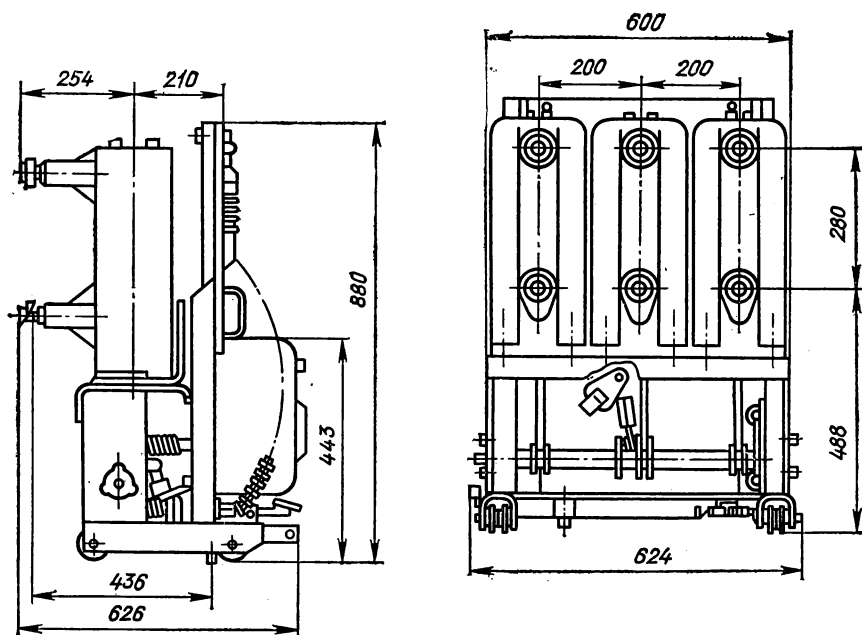


Рис. 27.57. Выключатель электромагнитный ВЭ-10 на токи 1250, 1600 и 2500 А

нию с камерой на номинальный ток отключения 31,5 кА);

контактами (на выключателях с номинальным током 1600 А и выше применяются контакты с серебряными напайками; выводные контакты выключателей с номинальным током 3600 А пальцевые, на остальных выключателях применяются контакты розеточного типа, при-

чем розетка выключателя с номинальным током 2500 А имеет 15 сегментов, розетки других выключателей имеют 11 сегментов);

проходными изоляторами (выключатели с номинальным током 2500 А имеют проходные изоляторы с большей площадью поперечного сечения токоведущего стержня по сравнению с проходными изоляторами выключателей с

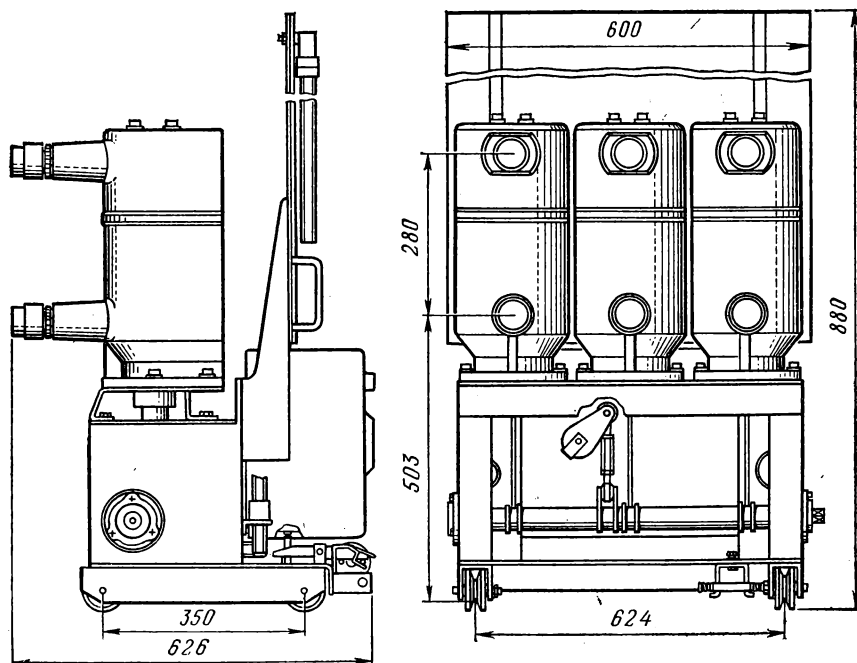


Рис. 27.58. Вакуумный выключатель ВВ-10

меньшим номинальным током; выключатели на номинальный ток 3600 А проходных изоляторов не имеют);

приводами (выключатели с номинальным током отключения 20 кА снабжены пружинными приводами, имеющими две включающие пружины; выключатели с номинальным током отключения 31,5 кА снабжены пружинными приводами с тремя включающими пружинами).

Вакуумные выключатели

Выпускается вакуумный выключатель типа ВВ-10 (рис. 27.58) на номинальные токи от 630 до 1600 А, номинальный ток отключения 20 кА. Выключатель имеет полное время отключения 0,075 с, допускает 20 000 отключений предельных отключаемых токов. Вакуумные дугогасительные камеры устанавливаются внутри изоляционных корпусов, несущих разъемные контакты.

27.6. ПРИВОДЫ К ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Электромагнитные приводы

Электромагнитные приводы являются приводами прямого действия — энергия для включения непосредственно потребляется от источника большой мощности.

Особенности приводов: 1) тяговая характеристика, развиваемая электромагнитом, соответствует характеристике противодействующих сил масляного выключателя; 2) приводы надежно работают при суровых климатических условиях; 3) требуется мощный источник постоянного тока с малым внутренним сопротивлением; так, для одновременного включения трех полюсов масляного выключателя напряжением 220 кВ требуется аккумуляторная батарея, которая дает ток 750 А при напряжении 220 В; 4) в связи с большими потребляемыми токами сечение кабелей, подводящих напряжение к включающему электромагниту, получается значительным (выбирается из условия падения напряжения на кабеле, питающем привод); 5) вследствие электромагнитных процессов, происходящих в приводе, время включения получается значительным (в мощных приводах до 1 с).

Дальнейший рост отключаемых мощностей выключателей, сокращение времени цикла АПВ затрудняют применение этих типов приводов. Увеличение мощности приводов наталкивается на необходимость применения аккумуляторных батарей очень большой емкости и кабелей большого сечения для питания приводов. В связи с этим применение приводов этого типа рекомендуется для выключателей небольшой мощности.

Размеры магнитопровода и обмоточные данные выбирают, исходя из $P'_{рез}$ при $H=0$. $P'_{рез}$ — результирующая сила, приведенная к якору электромагнита; $H=0$ соответствует максимальному зазору электромагнита $\delta=\delta_0$ (выключатель отключен):

$$P_{э,м} = 1,2P'_{рез}.$$

Рекомендуется бронева магнитная система:

$$P_{\delta} = aP_{э,м},$$

где P_{δ} — сила, развиваемая торцом сердечника (см. § 29.1); $a=0,5-0,7$ — коэффициент, учитывающий возрастание силы за счет потока рассеяния;

$$P_{\delta} = \frac{0,5}{\mu_0} B_{\delta}^2 S = \frac{0,5 B_{\delta}^2 \pi r^2}{4\pi \cdot 10^{-7}},$$

где $B_{\delta}=0,5-1,0$ Тл; r — радиус сердечника, м.

При правильном выборе δ_0 отношение $\delta_0/2r=1-1,25$, где δ_0 — начальный зазор электромагнита, соответствующий $H=0$.

Если отношение $\delta_0/2r$ не соблюдается, то нужно задаться новым значением δ_0 , определить новое значение $P'_{рез}$, пока не получится $\delta_0/2r=1-1,2$; при этом нужно менять рычаги механизма для получения требуемой зависимости $H=f(\delta)$.

Размеры обмоточного окна определяются из соотношений $r/R=0,78$; $l/\delta_0=1,6$, где R — внутренний радиус корпуса, м; l — высота окна обмотки, м.

Находим МДС при $\delta=\delta_0$.

При выбранных размерах электромагнита и МДС обмотки строится статистическая тяговая характеристика электромагнита с учетом магнитного сопротивления стали.

Если работа электромагнита больше, чем работа противодействующих сил, то электромагнит пригоден для привода выключателя (первое приближение, окончательно вопрос о пригодности привода может быть решен только после построения динамической тяговой характеристики).

Магнитодвижущую силу катушки в установившемся режиме при $U_{ном}$ на ее выходах находят по уравнению

$$Iw_{ном} = \frac{Iw_{расч}(1 + 0,004\Theta_1)}{\gamma\beta(1 + 0,004\Theta_2)},$$

где $\gamma=0,85$ учитывает возможную посадку напряжения на приводе (берется согласно ГОСТ 687-78);

$$\beta = I_{ср}/I_y,$$

где $I_{ср}$ — средний ток при работе электромагнита; I_y — установившийся ток; β можно принять равным 0,6—0,7; $\Theta_1=50^\circ\text{C}$; Θ_2 — предельная температура обмотки, равная примерно 20°C .

После определения $Iw_{ном}$ находят данные обмотки.

Построение динамической характеристики ведется по методу Н. Е. Лысова. Все противодействующие силы и массы приводятся к якору электромагнита (силы инерции учитываются методикой расчета). Напряжение на обмотке следует брать $0,85U_{ном}$, сопротивление — при $\Theta_2=50^\circ\text{C}$.

В результате расчетов получаем

$$\delta = f(t); \quad i = f(t); \quad V_{я} = f(t); \quad V_{я} = f(\delta); \\ P_{я} = f(\delta).$$

При помощи плана скоростей и $H=f(\delta)$ находим $v=f(H)$ и $H=f(t)$. Если V_k — ско-

рость в момент замыкания контактов, то желательно, чтобы $\Sigma m_{\text{привед}} V_K^2 / 2$ была больше работы всех сил, противодействующих включению после касания контактов, при этом привод может обесточиваться в момент касания контактов. В мощных выключателях с торцевыми контактами привод приходится обесточивать в самом конце хода.

Демпфер включения выполняется пружинного типа.

Предельный ток включения с точки зрения работы привода определяется уравнением

$$\Sigma m_{\text{привед}} v_{\text{ост}}^2 / 2 = P_{\text{э,д}} H_K = \\ = f(I_{0,\text{ном}}^2) H_K,$$

где $v_{\text{ост}}$ — скорость в момент прохода положения, соответствующего посадке механизма на защелку привода; $P_{\text{э,д}}$ — средняя электродинамическая сила, действующая на подвижную токоведущую часть; H_K — ход в контактах.

Пружинные приводы

В пружинном приводе энергия, необходимая для включения, запасается в мощной пружине, которая заводится либо от руки, либо с помощью двигателя малой мощности (менее 1 кВт).

Особенностью тяговой характеристики такого привода является уменьшение усилий, развиваемых их к концу хода включения вследствие уменьшения деформации включающих пружин. Для уменьшения этого недостатка с пружиной через специальную муфту связывается маховик, который поглощает избыточную энергию включающих пружин в начале хода включения. Энергия, накопленная маховиком, отдается им механизму выключателя в конце хода, когда силы, противодействующие включению, значительно возрастают (сжимаются контактные, буферные пружины, отключающие пружины развивают наибольшие усилия).

Пружинные приводы позволяют осуществлять цикл АПВ. В этом случае после операции включения необходимо завести включающую пружину. Примерами исполнения являются пружины УГП, УПГП, ПП и ППМ-10. Пружинные приводы нашли применение в малообъемных выключателях до 220 кВ.

В настоящее время широко применяются механизмы выключателя и привода, имеющие всего одну пружину, которая осуществляет как включение, так и отключение — рис. 27.59. Пружина выполнена в виде спирали и имеет малую жесткость, что позволяет производить до пяти включений и отключений без подзавода пружины.

При включении механизм освобождается на пол-оборота и подвижный контакт замыкается с неподвижным. При следующем освобождении механизма пружина делает следующие пол-оборота — происходит отключение выключателя. На рис. 27.59 показана зависимость перемещения подвижного контакта в функции угла поворота φ рычага пружины 2.

Преимуществом пружинного привода является отсутствие мощного источника постоянного тока, резервуаров со сжатым газом, клапанов и пневматического хозяйства.

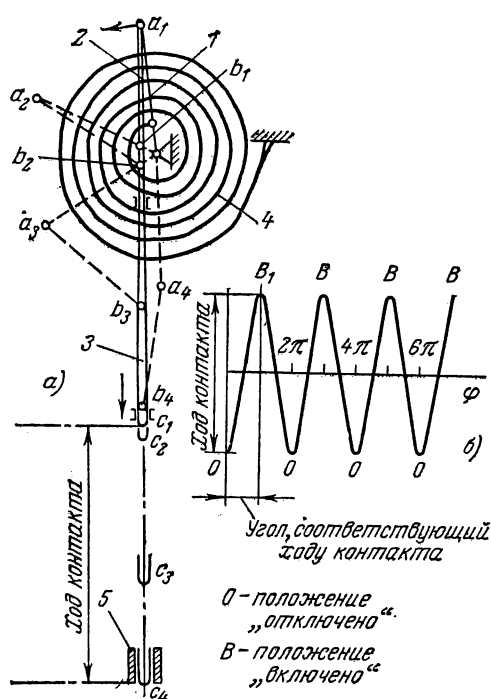


Рис. 27.59. Принцип действия механизма масляного выключателя, у которого одна пружина осуществляет включение и отключение:

а — эскиз механизма (1 — вращающийся рычаг; 2 — прямилло; 3 — подвижный контакт; 4 — спиральная пружина; 5 — неподвижный контакт); (a_1 — a_4 , b_1 — b_4 , c_1 — c_4 — траектории точек механизма); б — зависимость хода контакта от угла поворота φ

Пневматические приводы

Энергия запасается в резервуаре со сжатым воздухом, который приводит в движение поршень в цилиндре.

Наиболее удачной компоновкой является расположение на выключателе цилиндра и резервуара — это позволяет избежать потерь, связанных с движением воздуха по трубам. Компрессор приводится в действие двигателем мощностью менее 1 кВт. Расход воздуха на одну операцию включения невелик и позволяет проводить 5—6 операций без подкачки воздуха. В случае отсутствия напряжения на двигателе компрессора или выхода из строя двигателя привод может нормально функционировать без подкачки воздуха в течение 12—14 ч. Номинальное давление привода берется в зависимости от его мощности и колеблется от 1 до 1,7 МПа.

Особенностью тяговой характеристики является то, что усилие возрастает практически мгновенно и наибольшего значения достигает в начале хода. Это усилие слегка падает к концу хода. Для изменения тяговой характеристики сечение впускного отверстия может легко регулироваться путем механической связи регулирующего устройства с ходом поршня. В частности, сила, развиваемая приводом, может быть значительно увеличена к концу хода путем увеличения сечения питающего отверстия.

Поршень привода действует на выключатель через механизм свободного расцепления. Возврат поршня в исходное положение осуществляется пружинами. Для устранения демпфирования полость цилиндра после включения сообщается с атмосферой.

Особенности привода: 1) применение сжатого воздуха дает возможность создать привод с очень малым временем включения для самых мощных выключателей (время включения выключателя 330 кВ, 40 кА равно 0,25 с); за счет простого изменения диаметра поршня сила, развиваемая приводом, может быть сделана весьма большой; поршень имеет небольшую массу и не оказывает никакого влияния на временные характеристики выключателя; 2) сила, развиваемая пневмоприводом, быстро нарастает и мало изменяется с ходом, тяговая характеристика привода может легко изменяться путем применения регулируемого питающего отверстия; 3) пневмопривод не изменяет своей характеристики при частых включениях; 4) привод не требует мощного источника энергии, отпадает надобность в дорогостоящей аккумуляторной батарее, требующей сложного ухода; 5) управление и питание привода осуществляются по проводам малого сечения; 6) привод требует принятия особых мер для обеспечения нормальной работы при низких температурах (выбора соответствующего сечения трубопроводов, обеспечения стока воды, предупреждение образования снега в трубах, сушки воздуха).

Пневмогидравлические приводы

Аккумулирование энергии, необходимей для включения, осуществляется за счет сжатия газа, находящегося под большим давлением. Для того чтобы устранить возможность утечки и растревания, газ заключен в эластичный баллон, который в свою очередь размещен в стальном сосуде. Обычно в пневмогидравлических приводах используется азот.

Привод может быть широко применен и в малообъемных выключателях выше 110 кВ. В этом случае главный цилиндр, связанный с контактным механизмом, находится под высоким потенциалом. Управление осуществляется с помощью двух маслопроводов, связывающих главный цилиндр с остальной частью привода. Такая система позволяет значительно облегчить подвижную часть выключателя. Весь механизм выключателя получается весьма компактным.

Особенности привода: 1) высокое быстродействие — время включения около 0,25 с; оно может быть сделано меньше, чем у пневмати-

ческих приводов; 2) энергии, накопленной в приводе, достаточно, чтобы осуществить шестикратное включение без подкачки масла; 3) передача усилий осуществляется через практически несжимаемую среду; 4) все поверхности трения обильно смазываются маслом и не подвергаются коррозии; 5) привод позволяет легко осуществлять медленное ручное включение без применения специальных домкратов; 6) для обеспечения нормальной работы привода при любой температуре необходимо использовать жидкости, вязкость которых не зависит от температуры.

27.7. ПАРАМЕТРЫ ПРИВодОВ, ВЫПУСКАЕМЫХ В СССР

Приводы к выключателям переменного тока высокого напряжения в зависимости от вида энергии, используемой для осуществления операции включения выключателя, делятся на (табл. 27.15):

- а) ручные приводы прямого действия ПРА, ПР;
- б) электромагнитные приводы постоянного тока ПЭ, ШПЭ;
- в) пружинные приводы ПП-67; ППВ-10;
- г) пневматические приводы ПВ, ШПВ.

Приводы к выключателям соответствуют ГОСТ 687-78.

Приводы к выключателям имеют исполнения для внутренней и наружной установки. Приводы для наружной установки являются приводами внутренней установки, помещенными в специальные шкафы, предохраняющие от попадания пыли и влаги. К маркировке привода наружной установки добавляется буква Ш.

ПРА-17 — привод ручной, снабжен механизмом свободного расцепления, имеет электромагнит для дистанционного отключения. Привод предназначен для управления выключателями нагрузки типа ВН-16, ВНП-16, ВНП-17, ВН-11.

ПР-17 — привод ручной, рычажный, со свободным расцеплением. Предназначен для включения и отключения выключателей нагрузки и заменяет привод ПРА-17 в случае, когда не требуется дистанционное отключение.

ПП-67 — привод пружинный с заводом от двигателя, может быть установлен с выключателем, имеющим при включении максимальный статический момент на валу до 400 Н·м и статическую работу включения не выше 200 Дж. Угол поворота вала привода 120—155°. Включение выключателя происходит за счет энергии цилиндрических пружин, которые автоматически взводятся электродвигателем через редуктор после каждого включения (рис. 27.60, а).

Т а б л и ц а 27.15. Электромагнитные и пневматические приводы к выключателям

Тип	Тип выключателя	Потребление тока, А, при напряжении 120 В		Полное время выключения выключателя с приводом, с	Собственное время отключения выключателя с приводом, с	Масса, кг	Цена, руб.
		включение	отключение				
ПЭ-11	ВМГ-10	58	1,25	0,3	0,12	58	73
ПЭ-21	МГГ-10	145	2,5	0,4	0,12	275	260
ШПЭ-44	У-110-2000-40; У-220-1000/2000-25	240	5	0,8	0,50	750	590
ШПВ-45	У-220-1000/2000-25	3,6	2,5	0,5	0,05	270	950

ПЭ-11 — привод электромагнитный, имеет блокировку против «прыгания» и снабжен быстродействующими блокировочными контактами: КБВ в цепи включения и КБО в цепи отключения (рис. 27.61). Размыкание блок-контактов КБВ и КБО происходит со скоростью, не зависящей от скорости движения механизма привода, что обеспечивается специальными пружинами, которые заводятся в процессе включения привода и мгновенно освобождаются при расцеплении храповых механизмов тягами, связанными с валом привода.

ПЭ-21 — привод электромагнитный, имеет блокировку против «прыгания» и снабжен быстродействующими вспомогательными контактами КБВ и КБО (рис. 27.62).

ПЭ-44 — привод электромагнитный, имеет круто растущую силовую характеристику в конце хода включения. Привод содержит унифицированный механизм в виде отдельного блока и сменные электромагнитные блоки, устанавливаемые соответственно типу выключателя (рис. 27.63).

ПВ-30 — привод пневматический с механизмом привода ПС-30.

ШПВ-45 — привод пневматический наружной установки с унифицированным механизмом привода серии ШПЭ-44.

Варианты исполнения ручных и пружинных приводов характеризуются типом и количеством присоединяемых к приводу защитных и отключающих элементов.

Вариант исполнения обозначается цифровым индексом, каждая цифра которого соответствует определенному типу встроенного отключающего элемента:

1 — реле максимального тока мгновенного действия (РТМ);

2 — реле максимального тока с выдержкой времени (РТВ);

4 — отключающие электромагниты;

6 — реле минимального напряжения с выдержкой времени (РНВ);

8 — электромагнит релейного отключения с питанием от независимого источника оперативного тока;

0 — отсутствие в варианте исполнения отключающих элементов, действующих от защиты.

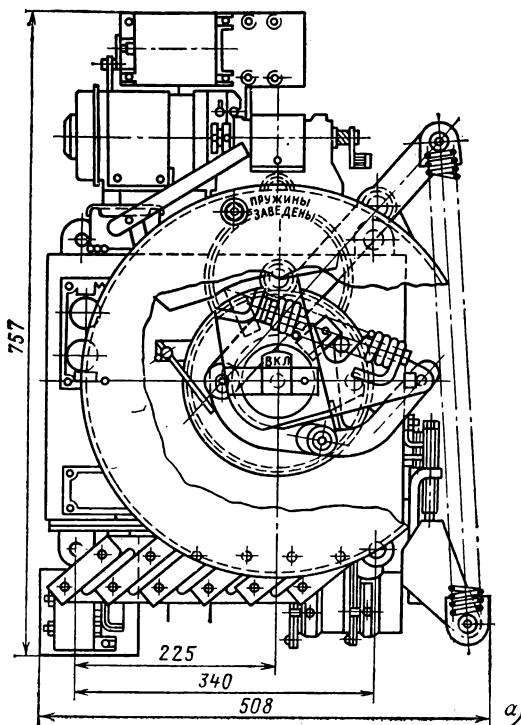
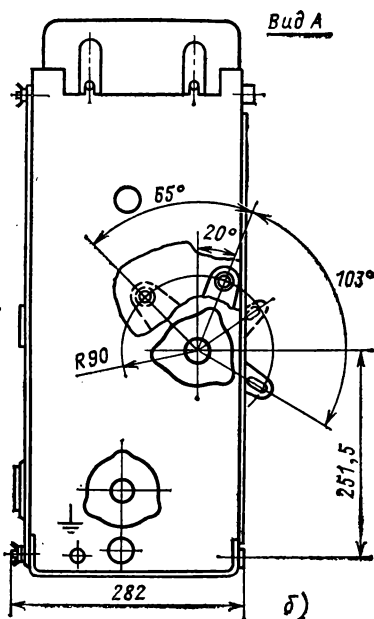
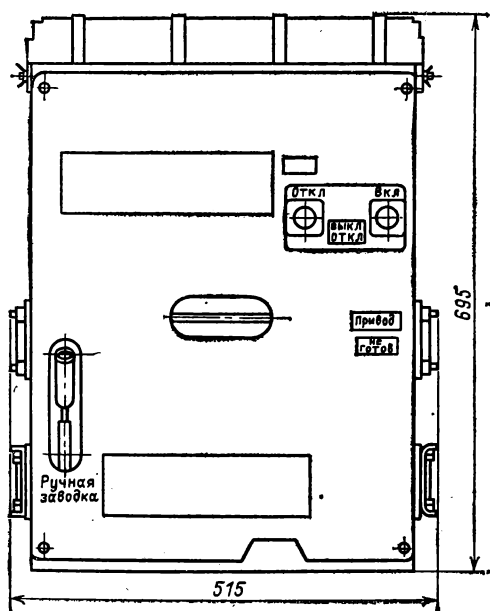


Рис. 27.60. Приводы серии ПП:

а — ПП-67; б — ППВ-10



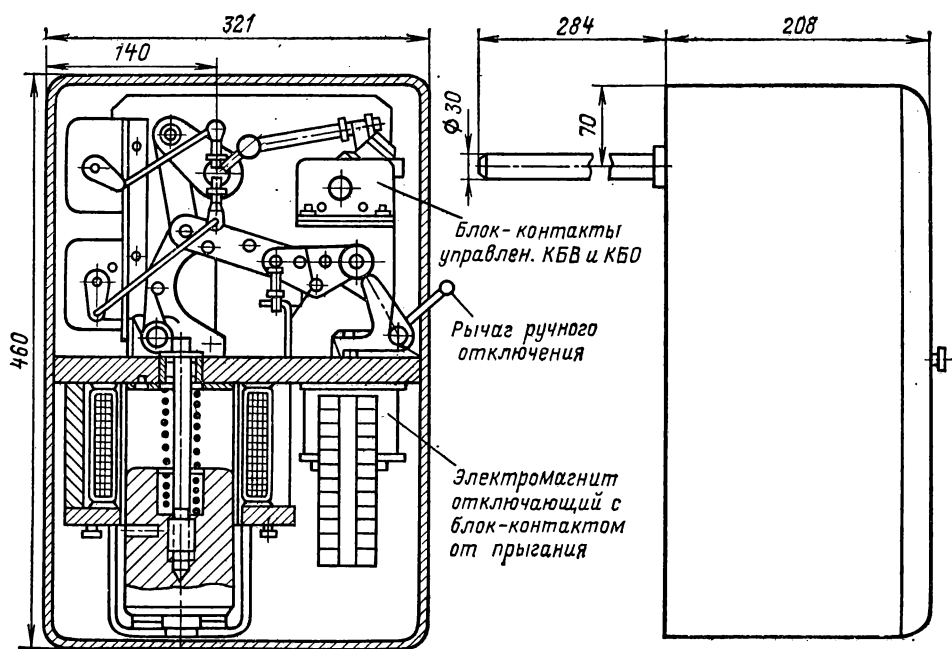


Рис. 27.61. Привод ПЭ-11

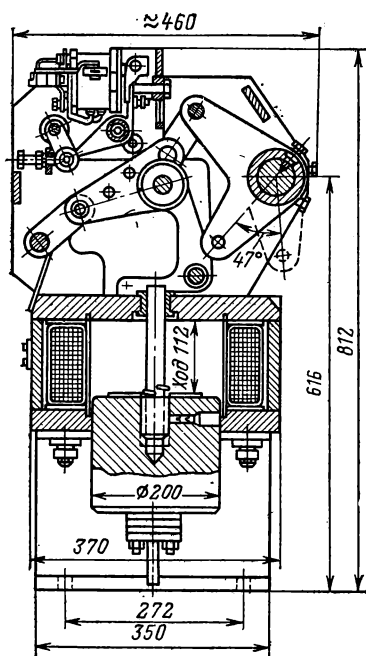


Рис. 27.62. Привод ПЭ-21

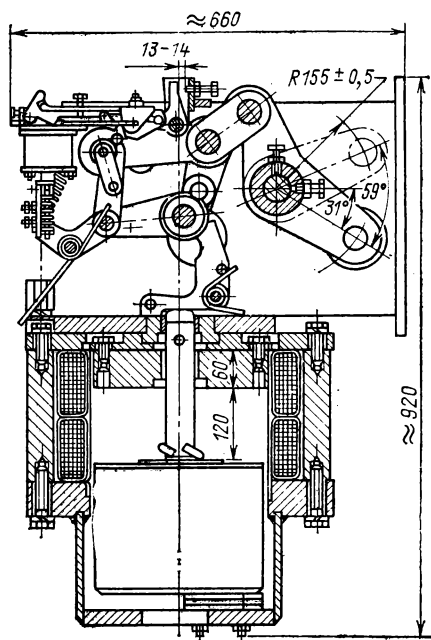


Рис. 27.63. Привод ПЭ-44

Например, вариант исполнения 110 показывает наличие двух реле РТМ, 400 — одного отключающего электромагнита.

В настоящее время в конструкциях выключателей широко применяются встроенные электромагнитные, пружинные и пневматические приводы.

27.8. РАЗЪЕДИНИТЕЛИ, КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛИ И ОТДЕЛИТЕЛИ

Общие сведения по разъединителям

Разъединители изготавливаются для внутренней (буква В в наименовании) и наруж-

Таблица 27.16. Размеры разъединителей для внутренней установки

Тип	Размеры, мм							Рисунок
	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	
РВО-6/400	—	72	—	360	230	126	404	27.64
РВО-6/630	—	72	—	360	235	130	408	
РВО-6/1000	—	92	—	380	280	153	440	
РВО-10/400	—	72	—	360	250	146	429	
РВО-10/630	—	72	—	360	255	150	433	
РВО-10/1000	—	92	—	360	180	153	440	
РЛВОМ-10/1000	—	210	—	356	—	190	460	
РВФ-6/400	—	—	—	—	347	175	601	27.66
РВФ-6/630	—	—	—	—	363	179	618	
РВФ-10/400	—	—	—	—	388	195	647	
РВФ-10/630	—	—	—	—	404	199	664	
РВФ-10/1000	—	—	—	—	419	199	690	
РВ-6/400	687	546	200	280	—	165	436	27.65
РВ-6/630	697	546	200	280	—	169	441	
РВ-6/1000	740	585	200	280	—	189	470	
РВ-10/400	837	646	250	280	—	185	461	
РВ-10/630	837	646	250	280	—	—	466	
РВ-10/1000	880	725	250	280	—	189	470	
РВ-20/400	1200	800	300	405	—	—	685	
РВ-20/630	1200	800	300	405	—	—	685	
РВ-20/1000	1200	800	300	405	—	—	685	
РВ-35/400	1750	1112	450	665	—	—	930	
РВ-35/630	1750	1112	450	665	—	—	930	
РВ-35/1000	1750	1112	450	665	—	—	930	

Таблица 27.17. Данные разъединителей переменного тока наружной установки

Ток разъединителя	Амплитуда предельного сквозного тока короткого замыкания, кА	Ток термической стойкости, кА		Масса разъединителя или одного полюса (полусного исполнения), кг	Цена, руб.	Ток разъединителя	Амплитуда предельного сквозного тока короткого замыкания, кА	Ток термической стойкости, кА		Масса разъединителя или одного полюса (полусного исполнения), кг	Цена, руб.
		главных ножей (Зс)	заземляющих ножей (Лс)					главных ножей (Зс)	заземляющих ножей (Лс)		
РЛНД-10/400	25	10(4с)	10	61	—	РНД (3)-150/3200	112	45	45	505	810
РОН-10 К/5000	180	71(4с)	—	105	—	РНД (3)-220/1000	100	40	40	775	610
РНД (3)-35/1000	63	25(4с)	25	81	90	РНД (3)-220/2000	100	40	40	866	730
РНД (3)-35/2000	80	31,5(4с)	31,5	178	190	РНД (3)-220/3200	125	50	50	900	1050
РНД (3)-35/3200	125	50(4с)	50	240	380	РНД (3)-330/3200	160	63(2с)	63	3510	2680
РНД (3)-110/1000	80	31,5	31,5	225	200	РНД (3)-500/3200	160	63(2с)	63	4250	3940
РНД (3)-110/2000	100	40	40	380	320	РПД-500/3200	160	63(2с)	—	6100	7900
РНД (3)-110/3200	125	50	50	451	650	РПД-750/3200	160	63(2с)	—	9370	—
РНД (3)-150/1000	100	40	40	426	460	РНВ (3)-750П/4000	—	63(2с)	—	8769	9100
РНД (3)-150/2000	100	40	40	500	530	РТЗ-1150/4000	100	40(2с)	—	13 370	—

ной (буква Н в наименовании) установки. Буква Л указывает на наличие линейного контакта, буква О — на однополюсное исполнение, З — на наличие ножей заземления (одного — 1 или двух — 2, в маркировке, после буквенного обозначения), Д — двухколонковую конструкцию. Числа в наименовании означают напряжение (кВ) и номинальный ток (А) (табл. 27.16 и 27.17).

Разъединители внутренней установки

Разъединители РВО (рис. 27.64) состоят из цоколя, опорных изоляторов и токопровода. Цоколь в виде швеллера служит основанием для установки малогабаритных изоляторов и крепления разъединителя.

Токопровод образует два одинаковых неподвижных контакта и соединяющий их под-

вижный нож. Во включенном положении нож запирается специальным зацепом, что исключает самопроизвольное открытие ножа под действием сил тяжести и электродинамических сил. Зацеп имеет ушко, в которое при включении и отключении разъединителя заводится палец изолирующей штанги. Открытие ножа на угол свыше 75° ограничивается упором на скобе осевого контакта.

Трехполюсные разъединители серии РВ (рис. 27.65) изготавливаются на напряжения от 6 до 35 кВ и номинальные токи до 1000 А. Каждый полюс имеет два неподвижных опорных изолятора и изолирующую тягу, присоединенную к общему валу. Включение и отключение разъединителя осуществляются поворотом вала с помощью привода, перемещающего тягу.

Разъединители с заземляющими ножами РВЗ в зависимости от варианта использова-

ния разъединителя имеют один или два вала с заземляющими ножами, которые с помощью пластин крепятся к раме. Заземляющие ножи снабжены дополнительными заземляющими контактами, которые укреплены под основными неподвижными контактами. В разъединителях РВЗ предусмотрена блокировка между валом основных и валом заземляющих ножей,

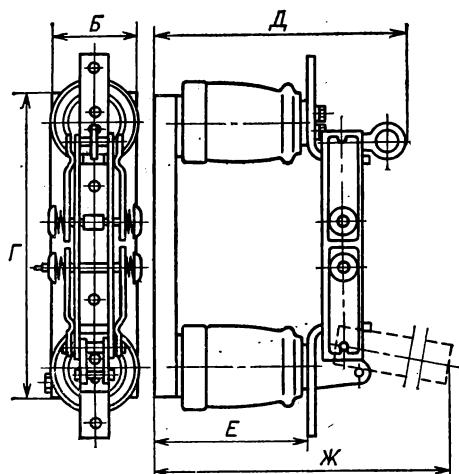


Рис. 27.64. Разъединитель однополюсный РВО

что исключает возможность ошибочных действий при оперировании с разъединителем.

Технические данные трехполюсных фигурных (наличие проходных изоляторов) разъединителей серии РВФ (рис. 27.66) аналогичны техническим данным разъединителей серии РВ на те же номинальные токи.

Разъединители для номинальных токов более 1000 А обычно изготавливаются в полюсном исполнении и при монтаже могут соединяться в двух- или трехполюсный аппарат.

На номинальные токи от 2000 до 8000 А предназначены разъединители серии РВР (рубящего типа). Неподвижные контакты такого разъединителя состоят из двух швеллерообразных частей, контактные ножи выполнены из меди коробчатого сечения и располагаются попарно в два этажа полками наружу (рис. 27.67).

На номинальный ток 12 500 А выпускаются разъединители серии РВП (с поступательным движением контактных ножей) (рис. 27.68). Достоинством конструкции таких разъединителей является малый момент на валу, что обеспечивается за счет системы кулачков, связанной с подвижным ножом полюса, снимающей контактное давление перед началом движения ножа на отключение и создающей его после окончательного движения на включение. Главные ножи разъединителей серии РВР управляются электродвигательным приводом ПДВ-1 или ручным приводом ПЧ-50, за-

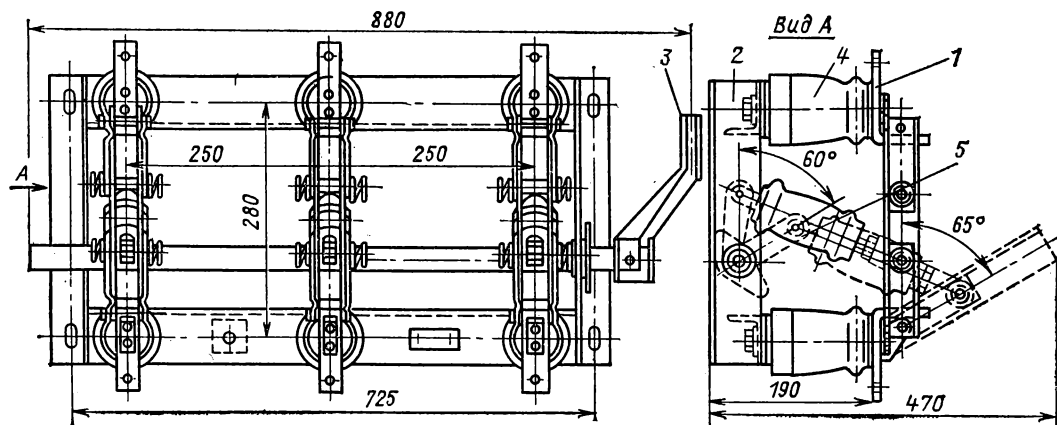


Рис. 27.65. Разъединитель трехполюсный РВ

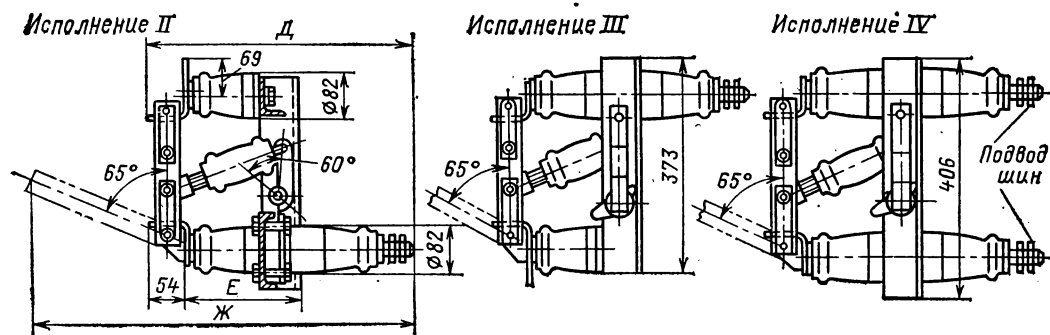


Рис. 27.66. Разъединитель РВФ

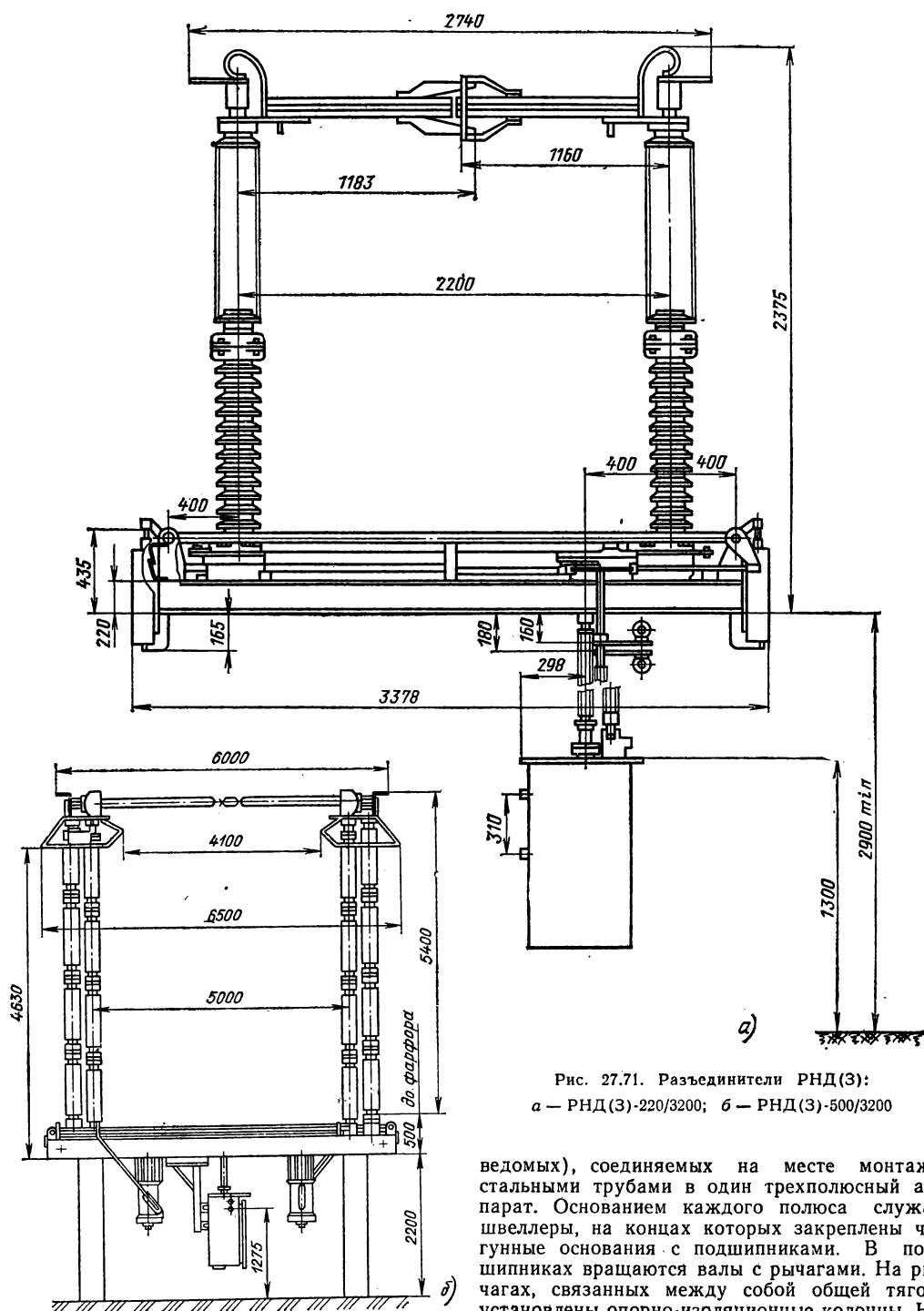


Рис. 27.71. Разъединители РНД(3):
а — РНД(3)-220/3200; б — РНД(3)-500/3200

дится либо вращением одного изолятора, на котором установлен нож разъединителя, либо одновременно вращением обоих изоляторов, связанных между собой тягами.

Разъединители серии РНД (3) горизонтально-поворотного типа изготавливаются из отдельных полюсов (одного ведущего и двух

ведомых), соединяемых на месте монтажа стальными трубами в один трехполюсный аппарат. Основанием каждого полюса служат швеллеры, на концах которых закреплены чугунные основания с подшипниками. В подшипниках вращаются валы с рычагами. На рычагах, связанных между собой общей тягой, установлены опорно-изоляционные колонны. На их верхних фланцах закреплены ножи контактной системы и контактные выводы. Ножи поворачиваются на 90° в одну сторону.

Разъемный контакт закрыт кожухом для обеспечения работы в условиях гололеда. При включении конец одного ножа входит в разъемный контакт, закрепленный на конце второго ножа.

Заземляющий нож представляет собой вторую трубу, один конец которой снабжен сегментным контактом, а другой приварен к валу. Валы заземляющих ножей вращаются в подшипниках, установленных на основании разъединителей. Нож заземления изолирован от основания разъединителя и имеет свой специальный контактный вывод. Ножи заземления управляются ручными приводами, главные ножи при напряжении 35 кВ управляются ручным приводом, при напряжении 110 кВ и выше — ручным и электродвигательными приводами.

Разработан разъединитель подвешенного типа РПД (рис. 27.72), в котором подвижный контакт в виде конуса, закрепленный через гирлянду изоляторов на тросе, опускается в неподвижный контакт в виде корзины, установленной на опорном изоляторе.

На напряжение 1150 кВ разработан разъединитель серии РТЗ, выполненный в виде двухколонкового аппарата с двумя телескопи-

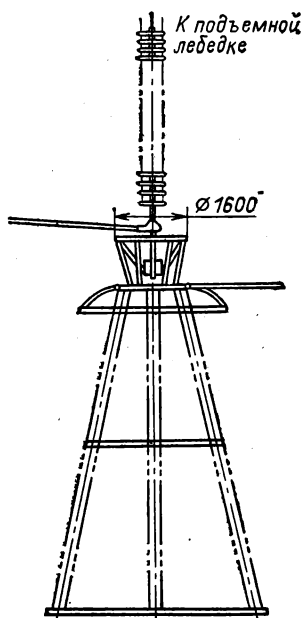


Рис. 27.72. Разъединитель подвешенный

ческими ножами, движущимися при включении поступательно навстречу друг другу в горизонтальной плоскости.

Разъединители удовлетворяют требованиям ГОСТ 689-69.

Короткозамыкатели и отделители

Короткозамыкатели наружной установки с приводом и трансформатором тока ТШЛ-0,5 предназначены для создания искусственного короткого замыкания (двухфазного у КРН-35 или на землю у КЗ-110, КЗ-150, КЗ-220) при повреждениях в трансформаторе (рис. 27.73). Короткозамыкатели представляют собой ап-

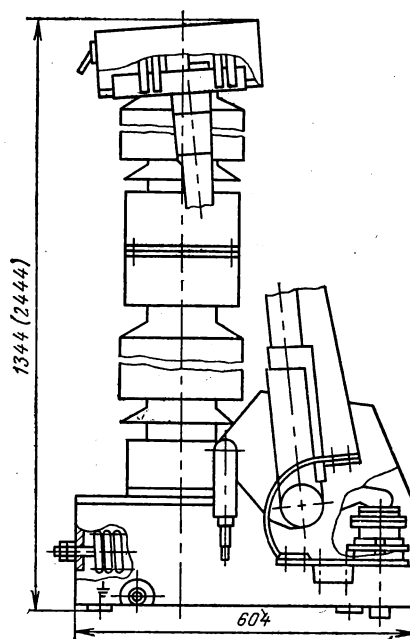


Рис. 27.73. Короткозамыкатель КЗ-110 (в скобках размеры КЗ-220)

параты вертикально-рубящего типа, состоящие из основания, изоляционной колонки, неподвижного контакта с выводом для присоединения к линии электропередачи и заземляющего ножа, на конце которого укреплен съемная контактная пластинка. В основании короткозамыкателя размещен вал, установленный в подшипниках, две включающие пружины с регулировкой натяжения, соединенные с основанием и рычагами вала короткозамыкателя, а также гидравлический буфер. Нормальное положение короткозамыкателя отключенное. При этом нож отведен от неподвижного контакта на разрядное расстояние, а его включающие пружины растянуты. Это положение ножа фиксируется приводом. При подаче сигнала на привод короткозамыкателя привод освобождает нож короткозамыкателя, который под действием пружины входит в неподвижный контакт, создавая короткое замыкание на землю.

Отделители предназначены для автоматического отключения поврежденного участка линии или трансформатора после искусственного короткого замыкания, а также для отключения и включения участков схемы, находящихся без напряжения, отключения и включения индуктивных токов холостого хода трансформаторов и емкостных токов ненагруженных линий.

Отделители (рис. 27.74) выполнены в виде однополюсных аппаратов с двумя опорно-поворотными изоляционными колонками. Поворот ножей при оперировании происходит в горизонтальной плоскости на угол 90°. Три полюса отделителей на напряжение 110 кВ соединяются при монтаже в один аппарат и управляются одним приводом. Каждый полюс

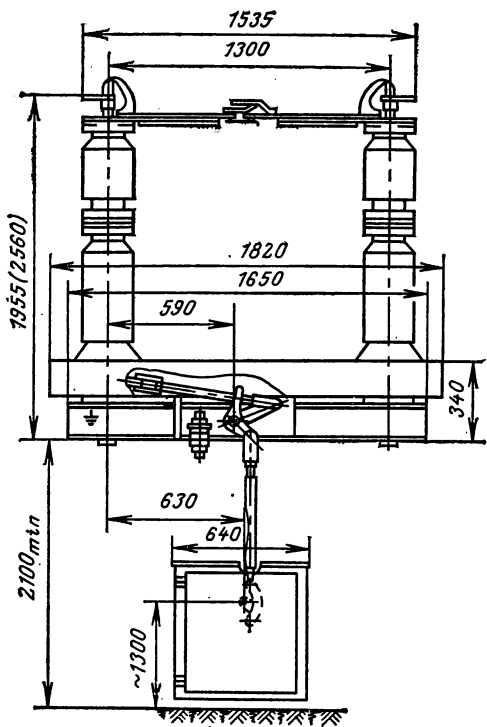


Рис. 27.74. Отделитель ОД-110У (в скобках размеры ОДЗ-220)

отделителей на напряжение 150 и 220 кВ управляется самостоятельным приводом. Рамой отделителей служит сварная конструкция из швеллеров, на концах которой закреплены чугунные основания. В основаниях на роликоподшипниках вращаются рычаги, на которых установлены изоляционные колонки. На верхних фланцах колонок закреплены контактные ножи и контактные выводы. Отключение отде-

Таблица 27.18. Технические данные короткозамыкателей

Тип короткозамыкателя	Амплитуда предельного сквозного тока, кА	3-секундный ток термической стойкости, кА	Время включения, с	Масса с приводом, кг	Цена, руб.
КРН-35	42	12,5 (4с)	0,15	48	80
КЗ-110У	32	12,5	0,28	210	320
КЗ-150	51	20	0,28	210	450
КЗ-150У	32	12,5	0,35	250	490
КЗ-220	51	20	0,35	250	500

Таблица 27.19. Технические данные отделителей

Тип отделителя	Амплитуда предельного сквозного тока, кА	3-й секундный ток термической стойкости, кА	Полное время отключения, с	Масса полюса, кг	Цена, руб.
ОД (3)-35/630	80	14	0,5	80	81
ОД (3)-110М/630		22	0,5	209	150
ОД-110У/1000	31,5		0,5	447	450
ОД-110/1000			0,45	367	—
ОД-150У/1000			0,55	517	600
ОД-150/1000			0,5	460	550
ОД-220/1000			0,6	540	700

лителей осуществляется при помощи энергии пружин, запасаемой одновременно с включением отделителей. Отделители управляются при помощи ручных приводов ПРО-1, обеспечивающих автоматическое, дистанционное и местное отключение и ручное включение отделителей. Технические данные короткозамыкателей и отделителей приведены в табл. 27.18 и 27.19.

Приводы к разъединителям

Для управления однополюсными разъединителями внутренней установки до 35 кВ при-

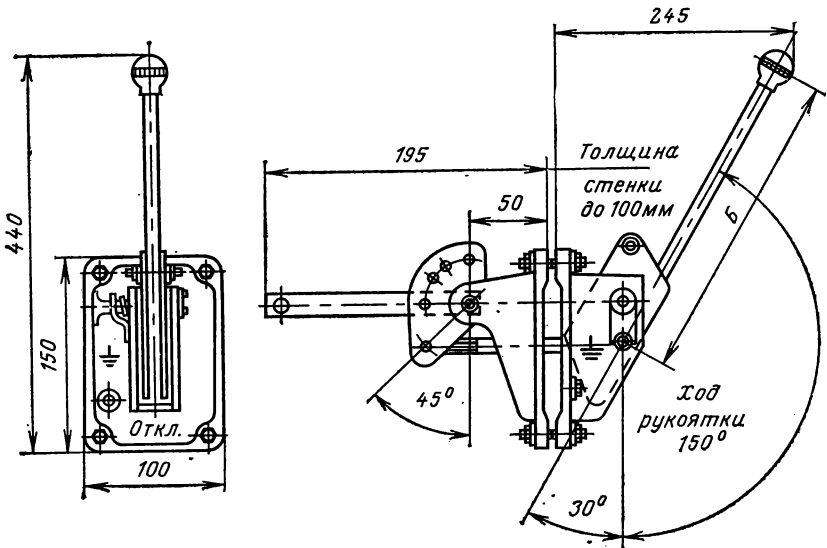


Рис. 27.75. Привод ручной рычажный ПР-10

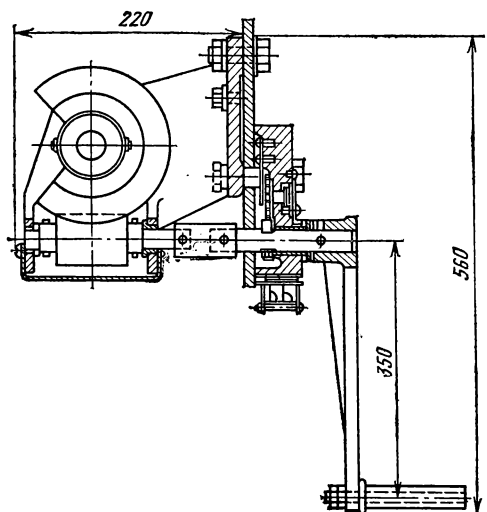


Рис. 27.76. Привод червячный ПЧ-50

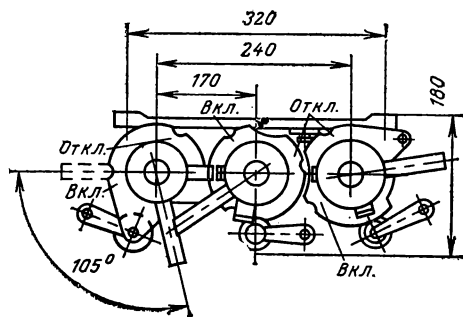
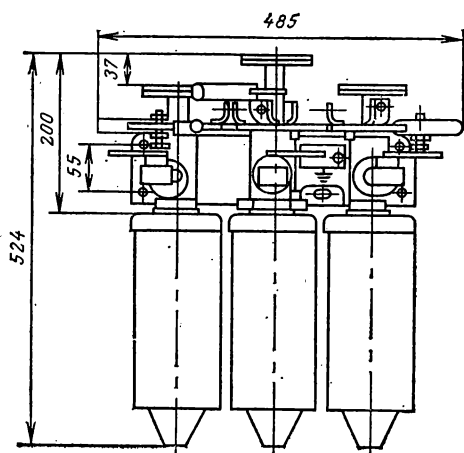


Рис. 27.77. Привод ручной ПРНЗ наружной установки

меняется оперативная изолирующая штанга, на одном конце которой укреплен стальной крючок, вдвигаемый при включении или отключении в отверстие на его ноже или в отверстие рычага на его валу,

Для управления разъединителя внутренней установки применяется ручной привод типа ПР-10, имеющий два исполнения, с нормальной и укороченной ручкой (рис. 27.75). Для управления разъединителя на большие токи применяется червячный привод типа ПЧ-50 (рис. 27.76).

Для управления разъединителя наружной установки применяются ручные приводы ПРНЗ (на напряжение 10 кВ) и ПР (рис. 27.77), конструкция которых усложняется при наличии в разъединителе ножей заземления.

Для дистанционного электрического управления разъединителями внутренней установки используются электродвигательные приводы.

Для управления главными и заземляющими ножами разъединителей наружной установки применяется электродвигательный привод ПДН-1. Привод выполнен в виде шкафа, в котором смонтированы основные узлы: силовой блок (электродвигатель, редуктор), элементы электрической схемы привода (пускатель, промежуточное реле, ключ управления, подогреватель), вспомогательные контакты и механизм управления или элементы электромагнитной блокировки.

Над крышкой шкафа привода расположены валы управления ножами разъединителя с муфтами указателей положения. Максимальный момент на валу главных ножей этого типа привода 180 Н·м, угол поворота главных ножей 90, 180 и 270°, угол поворота вала ножей заземления 90°. Приводы к разъединителям соответствуют ГОСТ 690-69.

27.9. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

Выпускаемые в настоящее время предохранители с кварцевым наполнителем предназначены для защиты электрических цепей переменного тока (ПКТ) и трансформаторов напряжения (ПKN) на номинальное напряжение от 3 до 35 кВ. Предохранители серий ПКЭ предназначены для защиты силовых электрических цепей переменного тока и трансформаторов напряжения на номинальное напряжение 6 кВ в комплектных распределительных устройствах экскаваторов и передвижных автоэлектростанций.

В условном обозначении предохранителя после обозначения серии первая цифра показывает номинальное напряжение, кВ, вторая — номинальный ток патрона предохранителя, А, третья — номинальный ток отключения, кА.

Основные технические данные предохранителей, а также габаритные, установочные, присоединительные размеры и массы приведены в табл. 27.19. Защитные характеристики предохранителей серий ПК1—ПК4 показаны на рис. 27.78. При отключении токов большой кратности по отношению к номинальному току плавкой вставки предохранитель работает с токоограничителем. Габаритные установочные и присоединительные размеры предохранителей приведены на рис. 27.79 и в табл. 27.20.

Для наружной установки выпускаются стреляющие предохранители серий ПС-10 и ПС-35М (рис. 27.80, 27.81). В стреляющем предохранителе при перегорании плавкой вставки контактный нож освобождается и,

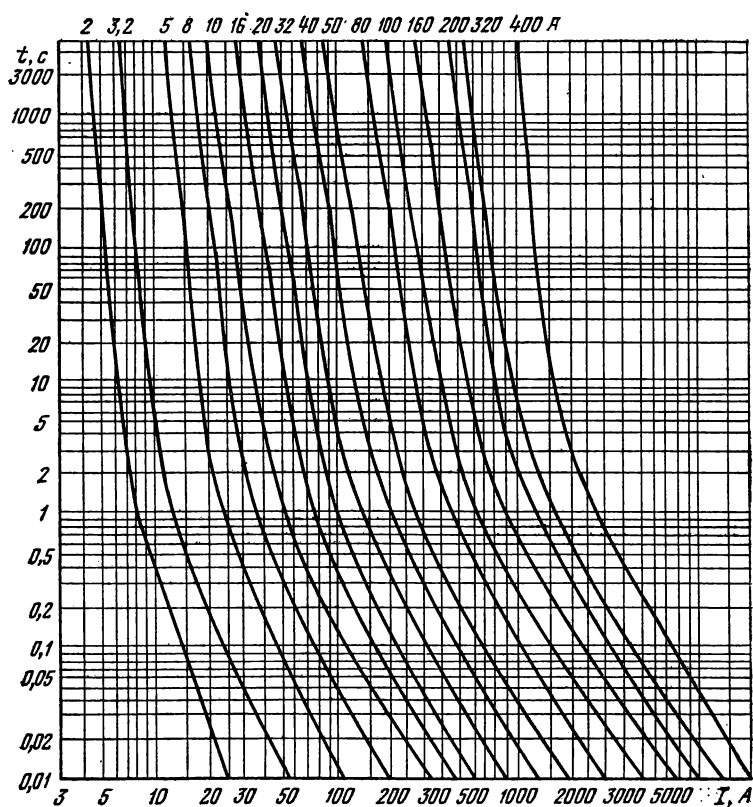


Рис. 27.78. Защитные характеристики предохранителей серий ПК1—ПК4

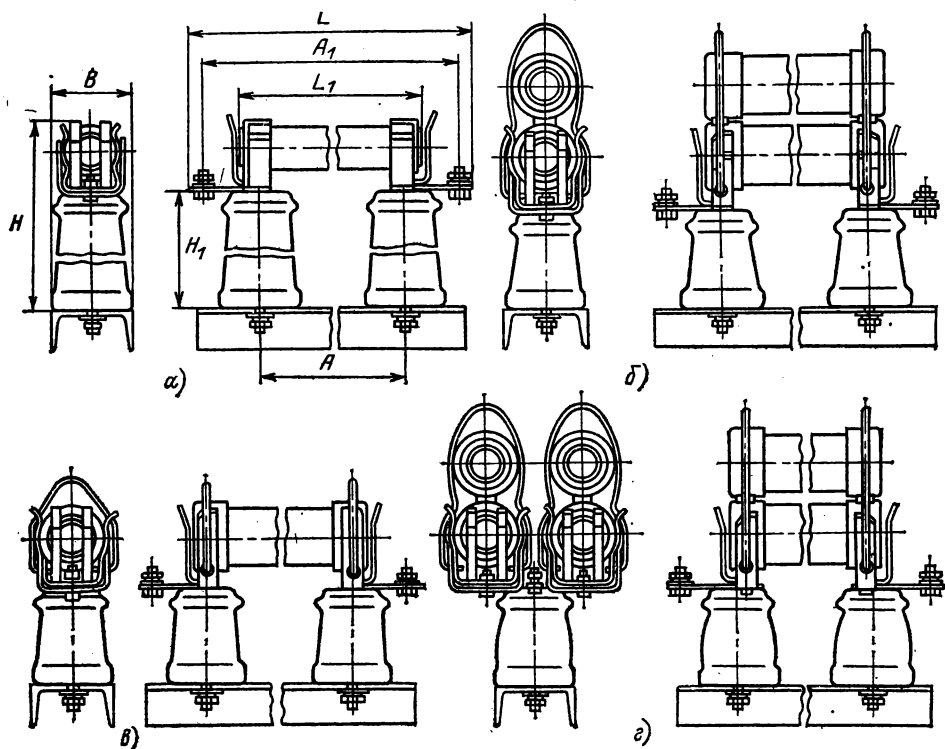


Рис. 27.79. Габаритные, установочные и присоединительные размеры предохранителей серий ПК1—ПК4

Таблица 27.20. Технические данные и размеры силовых предохранителей с кварцевым наполнением

Порядковый номер группы или предохранителя	Типоисполнение	Рисунок 27.79	Размеры, мм							Масса, кг
			A	A ₁	H	H ₁	L	L ₁	B	
1	ПКТ101-3-2-31,5-40 УЗ	а	185	296	176	100	320	212	77	3,4
2	ПКТ101-6-2-20-40 УЗ		285	396	176	100	420	312	77	3,9
3	ПКТ101-6-31,5-20 УЗ		385	496	196	120	520	412	82	4,9
4	ПКТ101-10-2-20-31,5 УЗ		505	636	286	210	660	512	110	11,1
5	ПКТ101-10-31,5-12,5 УЗ		620	736	448	372	760	612	110	17,4
6	ПКТ101-20-2-10-12,5 УЗ		230	342	215	100	366	264	84	4,5
7	ПКТ101-35-2-8-8 УЗ		330	442	215	100	465	364	84	5,0
8	ПКТ101-35-10-3,2 УЗ		430	542	235	120	566	464	84	6,3
9	ПКТ102-3-40-100-40 УЗ	а	552	681	325	210	705	562	110	12,7
10	ПКТ102-6-31,5-50-31,5 УЗ		665	781	487	372	805	662	110	19,0
11	ПКТ102-6-80-20 УЗ		230	342	290	100	366	264	84	6,2
12	ПКТ102-10-31,5-40-31,5 УЗ		330	442	290	100	466	364	84	7,3
13	ПКТ102-10-50-12,5 УЗ		430	542	310	120	566	464	84	9,2
14	ПКТ102-20-16-20-12,5 УЗ		552	681	400	210	705	562	110	16,0
15	ПКТ102-35-10-20-8 УЗ		665	781	562	372	805	662	110	22,9
16	ПКТ103-3-160-200-40 УЗ	б	248	372	290	100	396	264	184	10,2
17	ПКТ103-6-80-100-31,5 УЗ		348	472	290	100	496	364	184	12,4
18	ПКТ103-6-160-20 УЗ		448	572	310	120	596	464	184	15,5
19	ПКТ103-10-50-31,5 УЗ		306	400	246	170	446	324	120	7,7
20	ПКТ103-10-80-20 УЗ		406	500	246	170	546	424	120	8,1
21	ПКТ103-10-100-12,5 УЗ		512	641	391	315	665	524	150	21,2
22	ПКТ103-20-31,5-50-12,5 УЗ		185	296	196	120	320	212	82	4,2
23	ПКТ103-35-31,5-40-8 УЗ		405	536	285	210	560	412	110	10,8
24	ПКТ104-3-315-400-40 УЗ	в	620	736	448	372	760	612	110	17,4
25	ПКТ104-6-160-200-31,5 УЗ		302	396	246	170	442	318	120	7,5
26	ПКТ104-6-315-20 УЗ		508	636	391	315	660	518	150	21,0
27	ПКТ104-10-100-31,5 УЗ		724	936	516	440	960	618	175	40,5
28	ПКТ104-10-160-20 УЗ		302	416	180	100	440	318	88	4,3
29	ПКТ104-10-200-12,5 УЗ		402	516	200	120	540	418	96	5,8
30	ПКТ101-6-2-20-40 У1	—	352	466	196	100	490	368	94	5,6
31	ПКТ101-6-31,5-20 У1		452	566	216	120	590	468	100	7,3
32	ПКТ101-10-2-20-20 У1		352	466	258	100	490	368	94	8,6
33	ПКТ101-10-31,5-12,5 У1		452	566	288	120	590	468	100	11,0
34	ПКТ101-20-2-10-12,5 У1		185	296	196	120	320	212	82	4,2
35	ПКН001-10 УЗ	а	405	536	285	210	560	412	110	10,8
36	ПКН001-20 УЗ		620	736	448	372	760	612	110	17,4
37	ПКН001-35 УЗ		302	396	246	170	442	318	120	7,5
38	ПКН001-10 У1		508	636	391	315	660	518	150	21,0
39	ПКН001-20 У1		724	936	516	440	960	618	175	40,5
40	ПКН001-35 У1		302	416	180	100	440	318	88	4,3
41	ПКЭ106-6-5-20-20 У2		402	516	200	120	540	418	96	5,8
42	ПКЭ106-6-31,5-20 У2		352	466	196	100	490	368	94	5,6
43	ПКЭ106-10-5-20-12,5 У2	—	452	566	216	120	590	468	100	7,3
44	ПКЭ107-6-31,5-50-31,5 У2		352	466	258	100	490	368	94	8,6
45	ПКЭ107-10-31,5-40-12,5 У2		452	566	288	120	590	468	100	11,0
46	ПКЭ108-6-80-100-31,5 У2		352	466	258	100	490	368	94	8,6
47	ПКЭ108-10-50-80-12,5 У2		452	566	288	120	590	468	100	11,0

Таблица 27.21. Технические данные стреляющих предохранителей серии ПС

Тип предохранителя	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Номинальный ток плавкой вставки, А	Номинальный ток отключения, кА	Масса, кг	Цена, руб.
ПС-10 У1	10	100	8, 10, 16, 20, 32, 40, 50, 80, 100	5	23	23
ПС-35М У1	35			3,2	65,5	37

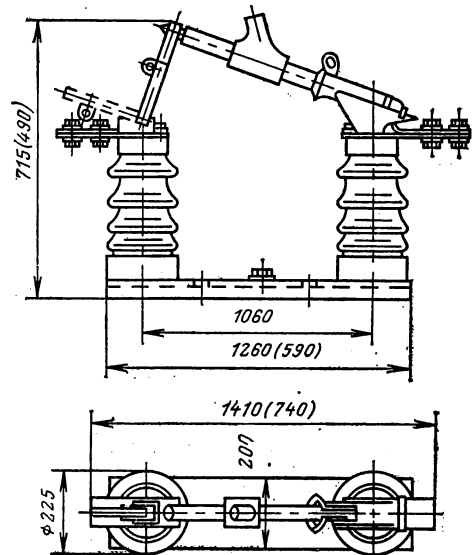


Рис. 27.80. Стреляющий предохранитель наружной установки серии ПКН-35М (в скобках размеры для ПСН-10)

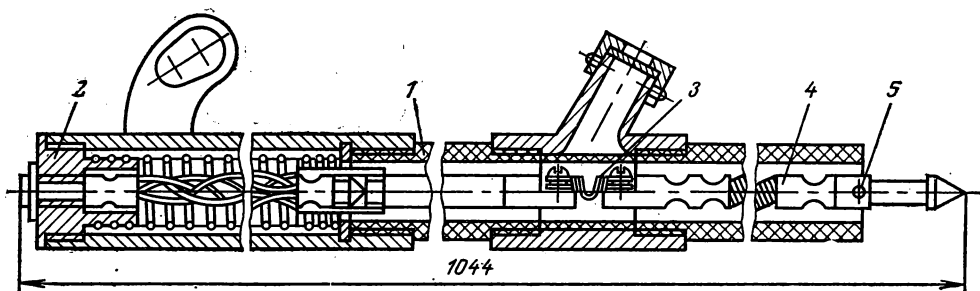


Рис. 27.81. Патрон предохранителя ПСН-35М:

1 — дугогасительная трубка; 2 — контактный болт и пробка; 3 — плавкий элемент; 4 — гибкий проводник; 5 — контактный наконечник

откидываясь под действием своей пружины, тянет гибкую связь. В результате этого на месте перегоревшей плавкой вставки возникает дуга. Под действием дуги стенки винипластовых трубок выделяют газ, повышающий давление в трубке и создающий продольно-поперечное дутье. Гибкая связь под действием пружины и выделяющихся газов выбрасывается из патрона. После отключения между ножом и концом трубки образуется воздушный промежуток, обеспечивающий надежную изоляцию в месте разрыва. Технические данные стреляющих предохранителей приведены в табл. 27.21,

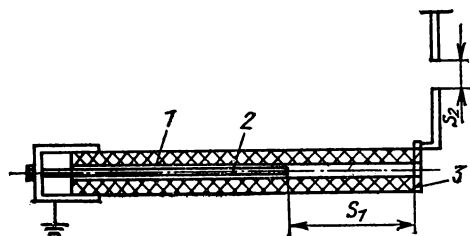


Рис. 27.82. Трубчатый разрядник:

1 — винипластовая трубка; 2 — стержневой электрод; 3 — кольцевой электрод; S_1 — внутренний разрядный промежуток; S_2 — внешний

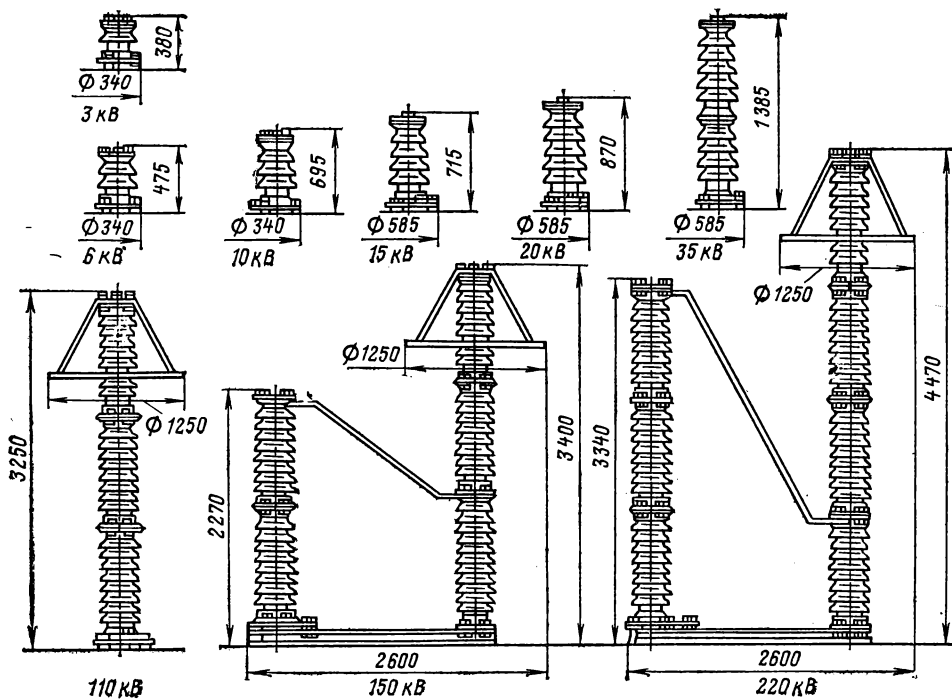


Рис. 27.83. Вентильный разрядник с магнитным гашением дуги

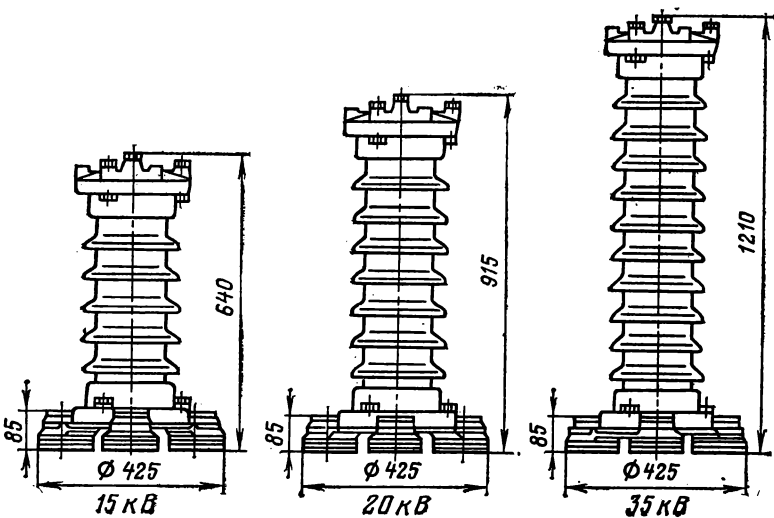


Рис. 27.84. Разрядник РВС

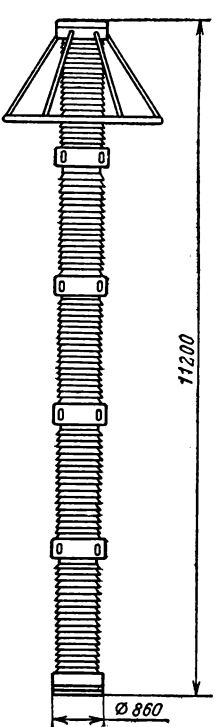


Рис. 27.85. Разрядник
РВМК-750

**27.10. РАЗРЯДНИКИ И
ОГРАНИЧИТЕЛИ
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

Для защиты изоляции от коммутационных и атмосферных перенапряжений применяются трубчатые разрядники (табл. 27.22, рис. 27.82), вентильные разрядники и ограничители перенапряжений.

Вентильные разрядники состоят из колонки искровых промежутков, обычных или с магнитным гашением дуги, шунтированных нелинейными резисторами, и линейных рабочих резисторов (вилитовых и тервитовых), заключенных в герметически закрытую фарфоровую крышку (рис. 27.83—27.85).

В настоящее время выпускаются вентильные разрядники серии РВС (разрядники вентильный стационарный), магнитно-вентильные серий РВМ, РВМГ, РВМКП (разрядники вентильные с магнитным гашением, К — комбинированные, П — повышенное напряжение гашения). Наиболее совершенными являются магнитно-вентильные разрядники серий РВМГ, РВМКП (ГОСТ 16357-83).

В качестве рабочего резистора в разрядниках РВМГ применяются вилитовые диски Ø 130 мм, а в РВМКП и РВТ — тервитовые диски Ø 70 мм. Защитный коэффициент по импульсному защитному уровню равен 2 у РВМГ, 2,25 у РВМКП и не выше 1,7 у РВТ.

Рабочие резисторы разрядников обладают пропускной способностью, достаточной, чтобы выдерживать без повреждений 20 импульсов тока 400 А прямоугольной формы длительностью 2 мс для РВМГ, 1000 и 1500 А синусоидальной полуволны 10 мс для РВМКП на 330 и 500 кВ и 50 импульсов $\frac{3}{8}$ мс с амплитудой не менее 3000 А для РВМК-750.

Таблица 27.22. Технические данные и размеры
трубчатых разрядников

Тип разрядника	Пределы отключаемых токов, кА	Искровой промежуток, мм		Внутренний диаметр трубки, мм	Масса, кг	Цена, руб.
		внутренний S_1	внешний S_2			
РТФ-3	0,3—5	75	10	8	1,38	4,7
РТФ-6	0,5—10	150	20	10	1,6	6,3
РТВ6, 10	0,5—2,5 2—10	60	10, 15	10	2,35 2,32	5,7
РТФ-10	0,2—1 0,5—5	225 150	25	10	1,6	6,4
РТВ-20	2—10	100	40	10	2,55	6,5
РТФ-35	0,5—2,5 1—5 2—10	250 200 220	130	10 10 16	2,34 2,36 3,97	12,9
РТВ-35	2—10	140	100	10	2,85	6,7
РТФ-110	0,5—2,5 1—5	450	450	12 20	11,43 11,2	—
РТВС-110	0,5—5	350	400	—	6	—

Таблица 27.23. Технические данные вентильных разрядников

Тип разрядника	Наибольшее допустимое напряжение разрядника, кВ	Пробивное напряжение (действующее значение), кВ, при частоте 50 Гц		Импульсное пробивное напряжение разрядника, кВ, при предразрядном времени от 2 до 20 мкс	Остающееся напряжение разрядника, кВ (не более), при импульсном токе с длиной фронта импульса 8 мкс с амплитудами			Масса, кг	Цена, руб.
		не менее	не более		3000 А	5000 А	10 000 А		
РВО-3	3,8	9	11	20	13	14	—	2,3	2,7
РВО-6	7,6	16	19	32	25	27	—	3,1	3,6
РВО-10	12,7	26	30,5	48	43	45	—	4,2	4,6
РВМ-15	19	35	43	57	47	51	57	94	100
РВС-15	19	38	48	67	57	61	67	—	43
РВМ-20	25	47	56	74	62	67	74	104	125
РВС-20	25	49	60,5	80	75	80	88	—	47
РВМ-35	40,5	75	90	116	97	105	116	165	190
РВС-35	40,5	78	98	125	122	130	143	—	54
РВМГ-110М	100	170	195	265	245	265	195	325	410
РВС-110М	100	200	250	285	315	335	367	—	185
РВМГ-150М	138	230	265	370	340	370	410	417	570
РВС-150М	138	275	345	375	435	465	510	—	330
РВМГ-220М	203	340	390	515	475	515	570	670	910
РВС-220М	200	400	500	530	630	—	—	—	490
РВМГ-330М	290	485	560	740	660	725	800	1016	1250
РВМГ-400	340	590	670	920	—	900	1000	2820	3200
РВМГ-500	525	660	760	1070	985	1070	1180	6280	6400
РВМК-750М	955	820	950	1500	—	—	1650	6200	30 000
РВМК-1150	1430	1100	1250	2000	—	—	—	11 700	55 000

Таблица 27.24. Технические данные нелинейных ограничителей перенапряжения

Тип ограничителя	Напряжение (действующее значение), кВ			Расчетный ток коммутационного перенапряжения на волне 1,2/2,5 мс, выдерживаемый не менее 20 раз, А	Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационного перенапряжения, кВ, не более	Расчетный ток грозового перенапряжения на волне 8/20 мкс, выдерживаемый не менее 20 раз, А	Остающееся напряжение при импульсном токе 5000 А с длиной фронта волны 8 мкс, кВ, не более	Ток грозового перенапряжения на волне 8/20 мкс, выдерживаемый не менее 2 раз, А	Масса, кг	Высота, мм
	наибольшее рабочее сети	на ограничителе, допустимое в течение 20 мин	на ограничителе, допустимое в течение 3,5 с							
ОПН-110У1	73	88	110	280	190	5000	250	15 000	115	1525
ОПН-150У1	100	120	138	350	260	5000	330	15 000	150	2080
ОПН-220У1	146	175	200	420	380	5000	460	15 000	215	2855
ОПН-330У1	240	250	290	630	545	5000	650	—	120	4340
ОПН-500У1	303	365	420	1200	720	15 000*	860	—	1700	5520
ОПНИ-500У1	303	365	420	1200	720	15 000*	860	—	1900	5520

* Волна 18/40 мкс.

Данные вентильных разрядников приведены в табл. 27.23.

Нелинейные ограничители перенапряжений состоят из высоконелинейных керамических резисторов на основе окиси цинка, размещенных в герметизированной фарфоровой крышке. В табл. 27.24 приведены характеристики нелинейных ограничителей перенапряжений. ОПНИ-500У1 является модификацией аппарата ОПН-500 и состоит из двух рабочих элементов: основного, включающего высоконелинейные резисторы и снабженного промежуточным выводом, и искрового, включающего последовательно соединенные искровые промежутки и конденсаторы. Искровой элемент подключается к промежуточному выводу основного элемента. Искровые промежутки всех трех фаз соединяются между собой, образуя звезду с изолированной нейтралью.

Список литературы

27.1. Афанасьев В. В. Конструкции выключающих аппаратов высокого напряжения. Л.: Энергия, 1969. 640 с.

27.2. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. М.: Энергия, 1973. 264 с.

27.3. Залесский А. М., Кукеков Г. А. Тепловые расчеты электрических аппаратов Л.: Энергия, 1967. 379 с.

27.4. Кукеков Г. А. Выключатели переменного тока высокого напряжения. Л.: Энергия, 1972. 338 с.

27.5. Афанасьев В. В., Вишневский Ю. И. Воздушные выключатели. Л.: Энергоиздат, 1982. 381 с.

27.6. Чунинин А. А. Электрические аппараты. М.: Энергия, 1975. 647 с.

27.7. Холявский Г. Б. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1962. 184 с.

27.8. Цейров Е. М. Воздушные выключатели высокого напряжения. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1957. 311 с.

27.9. Полтев А. И. Элегазовые аппараты. Л.: Энергия, 1971. 151 с.

27.10. Клепарская Л. Г. Синхронизированные выключатели. М.: Энергия, 1973. 111 с.

27.11. Шилин Н. В. Расчет давления в дугогасящих устройствах газового автодутья. — НДВШ. Электромеханика и автоматика, 1958, № 1, с. 251—269; Учет зависимости напряжения дуги от интенсивности дутья при расчете газодинамических процессов в дугогасящем устройстве газового автодутья. — НДВШ, Энергетика, 1958, № 3, с. 175—186.

27.12. Быков Е. И., Колузаев А. М. Электромагнитные выключатели ВЭМ-6 и ВЭМ-10. М.: Энергия, 1973. 104 с.

- 27.13. Основы теории электрических аппаратов/Под ред. Г. В. Буткевича. М.: Высшая школа, 1970. 600 с.
- 27.14. ГОСТ 687-78. Выключатели переменного тока на напряжения свыше 1000 В. Общие технические условия.
- 27.15. Афанасьев В. В., Адоньев Н. М., Карпенко Л. Н. Электрические аппараты высокого напряжения. Атлас конструкции. Л.: Энергия, 1977. 184 с.
- 27.16. Вентильные разрядники высокого напряжения/Д. В. Шишман, А. И. Брофман, В. И. Пружина, В. П. Савельев. Л.: Энергия, 1971. 264 с.
- 27.17. ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов без-

опасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.

27.18. ГОСТ 12.2.007.3-75. Система стандартов безопасности труда. Электротехнические устройства на напряжение свыше 1000 В. Требования безопасности.

27.19. Чунин А. А., Жаворонков М. А. Аппараты высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985. 429 с.

27.20. Афанасьев В. В., Якунин Э. Н. Разъединители. Л.: Энергия, 1979. 216 с.

27.21. Евтушенко В. А., Чунин А. А. Подвесные разъединители. М.: Энергоатомиздат, 1984. 145 с.

Раздел 28

ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

28.1. Выбор основных параметров при расчете трансформаторов тока (ТТ)	499	28.8. Оптико-электронные ТТ	513
Основные обозначения (499). Основные сведения (499). Методы уменьшения погрешности (502). Выбор параметров ТТ нормального исполнения для измерений (503)		28.9. Трансформаторы тока, выпускаемые в СССР	515
28.2. Компенсация погрешностей ТТ	507	28.10. Выбор основных параметров и расчет погрешностей трансформаторов напряжения (ТН)	525
Компенсация погрешности полем рассеяния (метод МЭИ) (508). Компенсация погрешности противонамагничиванием (508)		Основные обозначения (525). Общие сведения (526). Выбор основных параметров ТН нормального исполнения (528)	
28.3. Работа ТТ в установившемся режиме при глубоком насыщении магнитопровода	508	28.11. Каскадные, конденсаторные и оптико-электронные ТН	530
28.4. Работа ТТ в переходном режиме	509	Принцип действия каскадного ТН (530). Конденсаторный ТН (531). Оптико-электронные ТН (531)	
28.5. Выбор ТТ	511	28.12. Трансформаторы напряжения, выпускаемые в СССР	531
28.6. Каскадные ТТ	512	ТН с литой изоляцией (сухие) (533). Масляные ТН (533)	532
28.7. Магнитные ТТ индукционного типа	513	Список литературы	537

28.1. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА (ТТ)

Основные обозначения

I_1 — первичный ток, действующее значение, А;
 I_2 — вторичный ток, действующее значение, А;
 ΔI % — токовая погрешность;
 $\Delta \omega$ % — витковая коррекция;
 δ' — угловая погрешность;
 $K_{ном} = I_{1ном} / I_{2ном}$ — номинальный коэффициент трансформации;
 $U_{ном}$ — класс напряжения трансформатора, кВ;
 ω_1 — число витков первичной обмотки;
 $\omega_{2ном} = \omega_{1ном} K_{ном}$ — номинальное число витков вторичной обмотки;
 ω_K — число витков компенсационной обмотки;
 I_0 — намагничивающий ток (действующее значение), А;
 E_2 — ЭДС вторичной обмотки, В;
 $r_{2т}$ — активное сопротивление вторичной обмотки, Ом;

Основные сведения

Векторная диаграмма трансформатора тока (ТТ) показана на рис. 28.1, а.

$x_{2т}$ — реактивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки в Т-образной схеме замещения, Ом;
 R_2 — активное сопротивление нагрузки, Ом;
 X_2 — реактивное сопротивление нагрузки, Ом;
 Z_2 — сопротивление нагрузки, Ом;
 $Z_{2ном}$ — номинальная нагрузка, Ом;
 $Z_{вт}$ — полное сопротивление вторичной цепи, Ом;
 α — угол между ЭДС вторичной обмотки и вторичным током;
 ψ — угол потерь магнитопровода;
 H_0 — напряженность магнитного поля в сердечнике, А/м;
 H_a — активная составляющая H_0 , А/м;
 H_p — реактивная составляющая H_0 , А/м;
 S_c — сечение магнитопровода, м²;
 σ — механическое напряжение на изгиб в материале, Па;
 B — индукция, Тл.

В соответствии с ГОСТ 7746-78 принято такое положительное направление токов в обмотках, при котором в случае отсутствия погрешности первичный и вторичный токи совпадают по фазе.

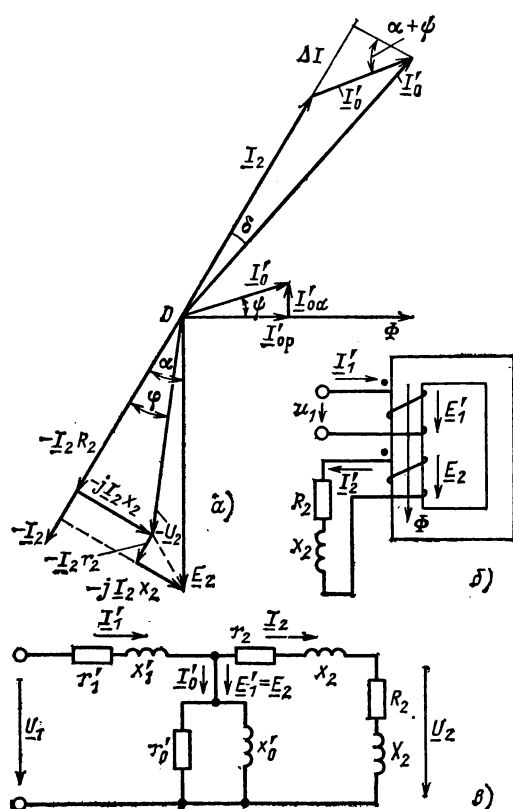


Рис. 28.1. Векторная диаграмма (а); условное положительное направление электрических величин (б); в — схема замещения

Токовая погрешность

$$\Delta I\% = \frac{K_{\text{ном}} I_2 - I_1}{I_1} 100.$$

При небольшой токовой погрешности ($\Delta I\% \leq 10\%$)

$$\begin{aligned} \Delta I\% &\approx \frac{I_0 \omega_1}{I_1 \omega_1} \sin(\alpha + \psi) \cdot 100 = \\ &= -\frac{I_0}{I_1} \sin(\alpha + \psi) \cdot 100; \\ \omega_2 &= \omega_{2\text{ном}}. \end{aligned}$$

Угловая погрешность ТТ — угол между векторами первичного и вторичного токов при таком выборе их направлений, когда при отсутствии угловой погрешности направления векторов совпадают. Угловая погрешность выражается в минутах или сантиградусах и считается положительной, когда вектор вторичного тока опережает вектор первичного тока.

Угловая погрешность в минутах

$$\begin{aligned} \delta' &= 3440 \frac{I_0 \omega_1}{I_1 \omega_1} \cos(\alpha + \psi) = \\ &= 3440 \frac{I_0}{I_1} \cos(\alpha + \psi). \end{aligned}$$

Полная погрешность $\varepsilon\%$ в условиях установившегося режима — действующее значение разности между произведением номинального коэффициента трансформации на мгновенное значение вторичного тока и мгновенным значением первичного тока, отнесенное к действующему значению первичного тока и умноженное на 100:

$$\varepsilon\% = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_{\text{ном}} i_2 - i_1)^2 dt}.$$

Токовой и угловой погрешностью пользуются при оценке работы ТТ в номинальном режиме ($I_1 \leq I_{1\text{ном}}$). При коротких замыканиях в сети ($I_1 \gg I_{1\text{ном}}$) пользуются полной погрешностью $\varepsilon\%$, которая по существу есть отношение намагничивающего тока I_0 к первичному току I_1 :

$$\varepsilon\% = \frac{I_0}{I_1} 100\%.$$

Токовая погрешность меньше полной — $\Delta I\% < \varepsilon\%$.

Основные номинальные параметры, требования к точности и значению вторичной нагрузки ТТ приведены в табл. 28.1—28.3 [28.1].

В некоторых режимах первичный ток может быть больше номинального (табл. 28.4). Вторичная нагрузка ТТ — полное сопротивление внешней вторичной цепи в омах с указанием коэффициента мощности. Вторичная нагрузка может характеризоваться также полной мощностью в вольт-амперах при данном коэффициенте мощности при номинальном вторичном токе.

Номинальная вторичная нагрузка — значение вторичной нагрузки с коэффициентом мощности 0,8, при которой трансформатору гарантируется класс точности или предельная кратность.

Для ТТ с номинальной вторичной нагрузкой менее 15 В·А нижний предел вторичной нагрузки должен соответствовать табл. 28.5.

Предельная кратность K_5 или K_{10} — наибольшее отношение первичного тока к его номинальному значению, при котором полная погрешность при заданной вторичной нагрузке не превышает соответственно 5 или 10 %.

Номинальная предельная кратность $K_{5\text{ном}}$ или $K_{10\text{ном}}$ — гарантируемая ТТ предельная кратность при номинальной вторичной нагрузке.

Ток термической стойкости — наибольшее действующее значение тока короткого замыкания за промежуток времени t , которое трансформатор тока выдерживает в течение этого промежутка времени без нагрева токоведущих частей до температур, превышающих допустимые при токах короткого замыкания и без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе.

Для ТТ на номинальное напряжение $U_{\text{ном}} \geq 330$ кВ термическая стойкость оценивается током односекундной или двухсекундной стойкости ($I_{1\text{т}}$, $I_{2\text{т}}$) или его отношением к номинальному току $K_{1\text{т}}$, $K_{2\text{т}}$. Соответственно для трансформаторов на напряжения до

Т а б л и ц а 28.1. Основные номинальные параметры трансформаторов тока (по ГОСТ 7746-78)

Номинальное напряжение (линейное) $U_{\text{ном}}$, кВ	0,66, 3, 6, 10, 15*, 20, 24, 27, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750
Номинальный первичный ток** $I_{1\text{ном}}$, А	1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 80, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 750, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10 000, 12 000, 14 000, 16 000, 18 000, 20 000, 25 000, 28 000, 30 000, 32 000, 35 000, 40 000
Номинальный вторичный ток $I_{2\text{ном}}$, А	1, 2***, 2,5***, 5
Номинальная вторичная нагрузка с коэффициентом мощности $\cos \varphi_2=0,8$, В·А	2,5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 100
Номинальный класс точности для измерений	0,2, 0,5, 1, 3, 5, 10****
Номинальный класс точности для защиты	5P; 10P

* Для существующих установок и генераторов с $U_{\text{ном}}=15,75$ кВ.

** Для встроенных трансформаторов тока, начиная от 75 А и выше; для трансформаторов тока, предназначенных для комплектации турбо- и гидрогенераторов, значения свыше 10 000 А являются рекомендуемыми.

*** Допускаются по согласованию с потребителем.

**** Только для встроенных трансформаторов тока.

Т а б л и ц а 28.2. Предельные значения погрешности трансформаторов тока для различных классов точности (по ГОСТ 7746-78)

Класс точности	Первичный ток, % номинального	Предельное значение погрешности			Пределы вторичной нагрузки, % номинальной, при $\cos \varphi_2 = 0,8$
		токовой, %	угловой		
			мин	10—2 рад	
0,2	5	$\pm 0,75$	$\pm 3'$	$\pm 0,9$	25—100
	10	$\pm 0,50$	± 20	$\pm 0,6$	
	20	$\pm 0,25$	± 15	$\pm 0,45$	
	100—120	$\pm 0,20$	± 10	$\pm 0,3$	
0,5	5	$\pm 1,5$	± 90	$\pm 2,7$	25—100
	10	$\pm 1,0$	± 60	$\pm 1,8$	
	20	$\pm 0,75$	± 45	$\pm 1,35$	
	100—120	$\pm 0,5$	± 30	$\pm 0,9$	
1	5	$\pm 3,0$	± 180	$\pm 5,4$	25—100
	10	$\pm 2,0$	± 120	$\pm 3,6$	
	20	$\pm 1,5$	± 90	$\pm 2,7$	
	100—120	$\pm 1,0$	± 60	$\pm 1,8$	
3	50—120	$\pm 3,0$	Не нормируется		50—100
5	50—120	$\pm 5,0$			50—100
10	50—120	± 10			50—100

П р и м е ч а н и е. Погрешности ТТ не должны выходить за пределы ломаной линии, состоящей из отрезков, проведенных через точки предельных погрешностей.

220 кВ включительно — током трехсекундной стойкости $I_{3т}$ и отношением $K_{3т}$.

Ток электродинамической стойкости — наибольшее амплитудное значение тока короткого замыкания за все время его протекания, которое ТТ выдерживает без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе.

Электродинамическая стойкость может быть задана кратностью тока электродинамической стойкости i_y к амплитуде номинально-го тока $I_{\text{ном}} \sqrt{2}$:

$$k_{\text{дин}} = i_y / I_{\text{ном}} \sqrt{2}.$$

Между токами электродинамической и термической стойкости должны выдерживаться соотношения:

$$i_y \geq 1,8 \sqrt{2} I_{2т} \text{ для } U_{\text{ном}} \geq 330 \text{ кВ};$$

$$i_y \geq 1,8 \sqrt{2} I_{3т} \text{ для } U_{\text{ном}} \text{ до } 220 \text{ кВ}$$

включительно,

Т а б л и ц а 28.3

Класс точности	Пределы допускаемых погрешностей			
	При номинальном первичном токе			При токе номиналь- ной предельной кратности
	Токовая погреш- ность, %	Угловая погрешность		
		мин	10—2 рад	Полная погрешность, %
5Р	±1	±60	±1,8	5
10Р	±3	—	—	10

Т а б л и ц а 28.4. Наибольшие допустимые рабочие первичные токи (по ГОСТ 7746-78)

Номинальный первичный ток, А	1	5	10	15	20	30	40	50	75	80	100	150	200	250	300	400	500
Наибольший рабочий первичный ток, А	1	5	10	16	20	32	40	50	80	80	100	160	20	250	320	400	500
Номинальный первичный ток, А	600	750	800	1000	1200	1500	2000	3000	4000	5000	6000	8000	10 000				
Наибольший рабочий первичный ток, А	630	800	800	1000	1250	1600	2000	3200	4000	5000	6300	8000	10 000				

П р и м е ч а н и е. Промышленность выпускает ТТ на первичный ток до 40 000 А. Для ТТ на номинальные токи свыше 10 000 А наибольший рабочий первичный ток должен приниматься равным номинальному первичному току.

Т а б л и ц а 28.5. Нижний предел вторичной нагрузки ТТ

Номинальная вторичная нагрузка, В·А	2,5	5	10
Нижний предел вторичной нагрузки Z_2 в процентах от $Z_{2ном}$, $\cos \varphi_2 = 0,8$	50	75	37,5

П р и м е ч а н и е. Для ТТ с номинальной вторичной нагрузкой более 60 В·А нижний предел должен определяться из выражения $Z_2 = 15/I_{2ном}^2 (Z_2, \text{Ом}, I_{2ном}, \text{А})$.

Точность работы защитного ТТ характеризуется полной погрешностью ϵ %. При номинальной нагрузке $Z_{2ном}$ и номинальной предельной кратности полная погрешность ϵ не должна превышать 5 или 10 % в зависимости от класса точности. Так как при такой погрешности индукция в ТТ достигает 1,7—1,8 Тл, то при дальнейшем росте первичного тока наблюдается резкое возрастание намагничивающего тока и полной погрешности. Погрешности ТТ для защиты даны в табл. 28.3. Термическая и электродинамическая стойкости должны обеспечиваться при замкнутой накоротко вторичной обмотке.

Трансформаторы тока наружной установки подвержены дополнительным механическим воздействиям ветра и тяжения проводов, которыми они присоединяются в цепь. Расчетная скорость ветра 30 м/с, сила тяжения до 500 Н при $U_{ном} \leq 35$ кВ, до 1000 Н при $U_{ном} = 110 \div 220$ кВ, до 1500 Н при $U_{ном} = 330$ кВ.

При номинальном напряжении $U_{ном} \geq 3$ кВ требования к изоляции должны соответствовать ГОСТ 1516.1-76 и ГОСТ 9920-75. При $U_{ном} = 0,66$ кВ испытательное одномоментное напряжение для первичной обмотки 3 кВ, для вторичной 2 кВ.

Междувитковая изоляция вторичной обмотки должна выдерживать без пробоя в течение 1 мин напряжение, индуцируемое в обмотке при разомкнутых ее выводах. Значение первичного тока равно номинальному в том случае, если напряжение на разомкнутых выводах $U_{2раз} < 3,5$ кВ. Если $U_{2раз} > 3,5$ кВ при токе $I_1 = I_{1ном}$, то при испытаниях устанавливается первичный ток такого значения, что $U_{2раз} = 3,5$ кВ.

Методы уменьшения погрешности

1. Увеличение первичной МДС.
2. Увеличение сечения магнитопровода, т. е. уменьшение B , а следовательно, $I_0 \omega$.
3. Уменьшение средней длины пути потока по магнитопроводу.
4. Изготовление магнитопровода из материала с высокой относительной магнитной проницаемостью μ_r и малым углом потерь φ .
5. Искусственное увеличение μ_r путем изменения положения рабочей точки на кривой намагничивания (компенсация погрешности) либо с помощью магнитного шунта, создающего подмагничивание полем рассеяния, либо за счет подмагничивания магнитопровода компенсационными обмотками. Последний метод позволяет улучшить характеристики на участке, охватывающем диапазон токов от 10 до 120 % номинального.

Компенсированные ТТ применяются при питании обмоток измерительных приборов.

Уменьшение угловой погрешности может быть достигнуто применением короткозамкнутого витка ($\omega_k=1$).

$$I_0 \omega_1' = I_0 \omega_1 + I_k,$$

$$I_k = -j \cdot 4,44 f \Phi_m / r_k,$$

где $I_0 \omega_1'$ — результирующая МДС при наличии короткозамкнутого витка; Φ_m — амплитуда потока, Вб; I_k — ток короткозамкнутого витка; r_k — активное сопротивление короткозамкнутого витка.

Наличие короткозамкнутого витка приводит к небольшому увеличению $I_0 \omega_1'$ и значительному уменьшению δ' из-за возрастания угла потерь ψ .

Выбор параметров ТТ нормального исполнения для измерений

Приводится ход расчета одновиткового проходного трансформатора с литой изоляцией с $U_{ном} \leq 35$ кВ. Для других типов даются соответствующие указания.

Заданы $U_{ном}$, $I_{1ном}$, $I_{2ном}$, класс точности; $Z_{2ном}$, $\cos \varphi_{2ном}$, термическая и электродинамическая стойкости.

1. Сечение первичной обмотки

$$q_1 = I_{1ном} / J, \quad J = 1,5 \div 1,8 \text{ А/мм}^2.$$

После окончательного конструирования трансформатора проводится проверка на нагрев при длительном режиме и при коротком замыкании. Для длительного режима $I_1 = 1,1 I_{1ном}$. Потери мощности в первичной обмотке $P_1 = k_d I_1^2 R_1$, где k_d — коэффициент добавочных потерь; R_1 — сопротивление стержня первичной обмотки на постоянном токе.

Потери мощности во вторичной обмотке

$$P_2 = I_2^2 r_{2т}; \quad I_2 = 1,1 I_{2ном},$$

где $r_{2т}$ — сопротивление вторичной обмотки.

При расчете полагаем, что теплота, выделяемая первичной обмоткой, отдается присоединяемой шине (рис. 28.2), теплота, выделяемая вторичной обмоткой, отдается через эпоксидное литье и внешнюю поверхность эпоксидной отливки. Согласно [28.12] температура

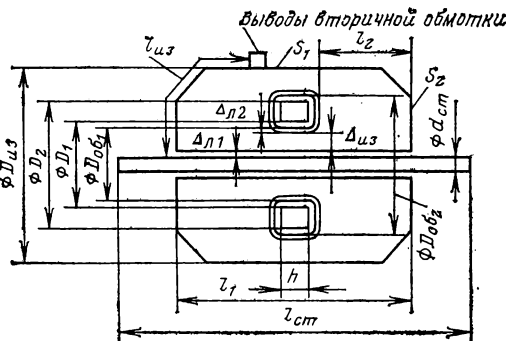


Рис. 28.2. Эскиз ТТ типа ТПОЛ

первичной обмотки в месте соединения с шиной

$$\Theta_1 = \Theta_0 + \tau_m = \Theta_0 + \tau_{ш} +$$

$$+ \frac{1}{2} I_1^2 R_1 \frac{1}{p \lambda q_{ш}};$$

$$\Theta_0 = 40^\circ \text{C};$$

$$\tau_{ш} = \frac{I_1^2 \rho}{q_{ш} k_{т,ш} S_0};$$

$$\rho = \sqrt{\frac{k_{т,ш} S_0}{\lambda q_{ш}}}; \quad R_1 = \frac{\rho l_{ст}}{q_1},$$

где $k_{т,ш} \approx 10$ Вт/(м²·°С) — коэффициент теплоотдачи с шины; S_0 — боковая поверхность единицы длины шины, м²; λ — удельная теплопроводность материала шины, Вт/(м·°С); $q_{ш}$ — сечение шины, м². Сопротивление R_1 , Ом, и удельное сопротивление ρ , Ом·м, берутся при $\Theta = 90 \div 100^\circ \text{C}$.

Температура вторичной обмотки

$$\Theta_2 = \Theta_0 + \tau_{пов} + \Delta \tau_{из};$$

$$\tau_{пов} = P_2 / k S_{охл}; \quad k = 7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ \text{C)},$$

где $S_{охл}$ — поверхность охлаждения изолятора; $S_{охл} = S_1 + 2S_2$; S_1 и S_2 — поверхности цилиндра и торца.

$$\Delta \tau_{из} \approx P_2 \frac{R_{т1} R_{т2}}{R_{т1} + R_{т2}};$$

$$R_{т1} = \frac{1}{2\pi \lambda_{из} l_1} \ln \frac{D_{из}}{D_{об2}};$$

$$R_{т2} = \frac{l_2}{2\lambda_{из} \pi (D_{об2}^2 - d_{ст}^2) / 4}.$$

Термическая стойкость. В соответствии с [28.7] для первичной обмотки

$$J_{к1}^2 t = A_{\Theta_k} - A_{\Theta_{ном}},$$

где $J_{к1} = K_{т1} I_{1ном} / q_1$; $K_{т1}$ — кратность тока односекундной термической стойкости. $A_{\Theta_{ном}}$ определяется для температуры $\Theta_{ном} = \Theta_1$

$$A_{\Theta_k} = \left(\frac{K_{т1} I_{1ном}}{q_1} \right)^2 \cdot 1 + A_{\Theta_{ном}}.$$

По A_{Θ_k} находят температуру первичной обмотки $\Theta_{к1}$ при коротком замыкании [28.7].

Аналогично определяется $\Theta_{к2}$ для вторичной обмотки при

$$J_{к2} = K_{т1} I_{2ном} / q_2.$$

Число витков первичной обмотки для многовитковых трансформаторов

$$\omega_1 = I_{1ном} \omega_1' / I_{1ном}.$$

Необходимое значение $I_{1ном} \omega_1'$ зависит от класса точности и материала магнитопровода (табл. 28.6).

2. Сечение магнитопровода

$$S_c \approx \frac{I_{2ном} Z_{2ном}}{4,44 f \omega_2 B_m},$$

где $B_m = 0,06 \div 0,1$ Тл; $\omega_2 = \omega_1 K_{ном} = I_{1ном} \omega_1' / I_{2ном}$.

Т а б л и ц а 28.6

Материал магнитопровода	$I_{\text{ном}}$ ω , А, при классе точности		
	0,5	1	3
1512	900	600	300
1561—1572	600	400	300

3. Размер магнитопровода. Внутренний диаметр ленточного магнитопровода D_1 выбирается таким образом, чтобы в окне магнитопровода разместились стержень первичной обмотки, вторичная обмотка, и между вторичной обмоткой и стержнем первичной должен быть зазор $\Delta_{\text{из}}$, который заполняется эпоксидным компаундом. Размер этого зазора выбирается из следующих соображений. Средняя рабочая напряженность поля при номинальном напряжении не должна превышать 1,8 МВ/м. Первичная и вторичная обмотки покрываются стеклолентой, которая создает буферное пространство для компенсации тепловых напряжений.

Внутренний диаметр магнитопровода D_1 можно определить по формуле

$$D_1 = \sqrt{(d_{\text{вн}} + 2\Delta_{\text{из1}})^2 + \frac{4Q_{\text{кр}}}{\pi}} + 2\Delta_{\text{из2}},$$

где $d_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр окна ТТ после намотки вторичной обмотки; $\Delta_{\text{из1}}$ — изоляция между магнитопроводом и вторичной обмоткой (электроизоляционный картон и киперная лента, около 1 мм); $Q_{\text{кр}}$ — сечение кольца, занятого вторичной обмоткой в окне ТТ; $\Delta_{\text{из2}}$ — изоляция сверху вторичной обмотки — электроизоляционный картон 0,5 мм и киперная

лента 0,5 мм. Диаметр $d_{\text{вн}}$ определяется по формуле

$$d_{\text{вн}} = d_1 + 2\Delta_1 + 2\Delta_2,$$

где d_1 — диаметр стержня первичной обмотки; Δ_1 — толщина буферной изоляции, 1 мм; Δ_2 — толщина эпоксидной изоляции, равная $\Delta_2 = U_{\text{ном}}/E_{\text{ср}}$; $U_{\text{ном}}$, МВ; $E_{\text{ср}} = 1,8$ МВ/м.

Максимальная напряженность электрического поля имеет место на поверхности стержня первичной обмотки и равна:

$$E = \frac{2U_{\text{ном}}}{d_{\text{ст}} \ln \frac{D_{\text{об1}}}{d_{\text{ст}}}} \leq 8 \text{ МВ/м.}$$

Испытательные напряжения для ТТ приведены в табл. 28.7, при частоте 50 Гц рекомендуется

$$E_{\text{исп}} = \frac{2U_{\text{исп}}}{d_{\text{ст}} \ln \frac{D_{\text{об1}}}{d_{\text{ст}}}}.$$

Из технологических соображений толщина эпоксидной изоляции не должна быть менее 4 мм.

Сечение

$$Q_{\text{кр}} = \frac{q_2 \omega_2}{K_y} \frac{4d_{2\text{из}}^2}{\pi d_2^2},$$

где d_2 — диаметр провода без изоляции; $d_{2\text{из}}$ — диаметр провода с изоляцией; K_y — коэффициент укладки обмотки. Радиальная толщина вторичной обмотки

$$\Delta_{\text{об}} = \frac{D_1 - d_{\text{вн}}}{2}.$$

Расстояние по поверхности эпоксидной изоляции $l_{\text{из}}$ выбирается таким образом, чтобы средняя напряженность электрического поля вдоль поверхности перекрытия не превышала

Т а б л и ц а 28.7. Нормированные испытательные напряжения ТТ с нормальной изоляцией, кВ

Класс напря- жения, кВ	Напряжения грозовых импульсов для испытания				Напряжение ком- мутационного импульса для испытания внеш- ней (в сухом состоянии и под дождем¹) и внут- ренней изоляции	Кратко-временные напряжения промышлен- ной частоты			
	внутренней изо- ляции		внешней изоляции			одноминутное для испытания внутрен- ней изоляции		при плавном подъеме для испытания внеш- ней изоляции	
						трансформаторы тока		в сухом состоянии	под дождем¹
	полный импульс	срезан- ный им- пульс	полный импульс	срезан- ный им- пульс		масляные	кроме масляных		
3	42	50	42	50	—	24	24	26	20
6	57	70	57	70	—	32	32	34	26
10	75	90	75	90	—	42	42	45	34
15	100	120	100	120	—	55	55	60	45
20	120	150	120	150	—	65	65	70	55
24	140	175	140	175	—	75	75	80	65
27	185	230	185	230	—	95	95	105	85
110	425	550	460	570	—	200	230	280	215
150	585	780	630	785	—	275	300	355	290
220	825	1090	900	1130	—	400	440	520	425
330	1100	1300	1150	1350	950	500	560	670	550
500	1500	1800	1600	1950	1300	700	760	900	740
750	2300	2500	2100	2600	—	—	950	1050	900
1150	—	—	2900	2100	2100	—	1150	1300	—

¹ Для трансформаторов тока категории размещения 1.

$E_{\text{доп, пов}} = 0,05$ МВ/м при номинальном рабочем напряжении:

$$l_{\text{из}} = U_{\text{ном}} / E_{\text{доп, пов}}.$$

В малоамперных (многовитковых) ТТ изоляция первичной обмотки должна рассчитываться с учетом повышения напряжения на ее выводах при коротком замыкании, так как индуктивное сопротивление первичной обмотки ТТ соизмеримо с сопротивлением цепи короткого замыкания.

Внешний диаметр сердечника D_2 и ширина сердечника h связаны соотношением

$$h = 2S_c / k_{3,c} (D_2 - D_1).$$

Диаметром D_2 задаются с таким расчетом, чтобы

$$h \geq (D_2 - D_1) / 2;$$

$k_{3,c}$ — коэффициент заполнения стали, обычно 0,85—0,9.

4. Активное и реактивное сопротивления рассеяния вторичной обмотки

$$r_{2T} = \rho_{50} l_2 / q_2; \quad q_2 = I_{2\text{ном}} / J;$$

$$J = 1,5 \div 1,8 \text{ А/мм}^2,$$

l_2 — длина провода вторичной обмотки, м.

Обычно витки вторичной обмотки равномерно распределены по магнитопроводу. Тогда $x_{2T} = 0$. Если обмотка не полностью охватывает магнитопровод (рис. 28.3), то x_{2T} , Ом, находится по методике НПО «Электроаппарат»:

$$x_{2T} = (6,7 \div 8) H \omega_2^2 \lg \frac{360}{\alpha} 10^{-6};$$

α — угол, занятый обмоткой; H находится по полусумме диаметров:

$(D_1 + D_2) / 2$, м	H , м
0,15	a
0,15—0,4	$a + b$
0,4	$a + 2b$

и рис. 28.3.

Для ТТ типов ТКФ, ТКЛ, ТПЛ x_{2T} , Ом:

$$x_{2T} = 8\pi^2 \kappa \omega_2^2 \frac{u}{h} \left(\delta + \frac{a_2}{3} \right) \cdot 10^{-7};$$

$$\kappa = 1 + \frac{\delta + a_1 + a_2}{\pi h};$$

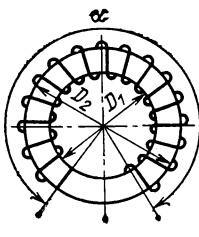


Рис. 28.3

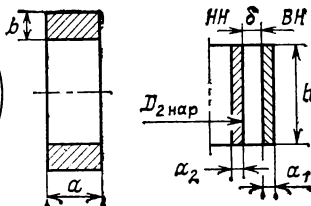


Рис. 28.4

Рис. 28.3. Расположение вторичной обмотки на магнитопроводе

Рис. 28.4. Расположение первичной и вторичной обмоток

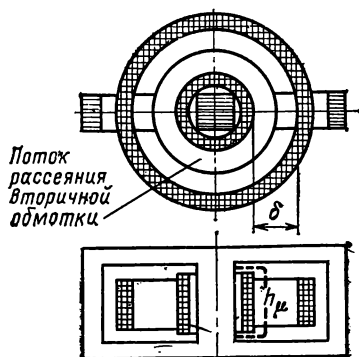


Рис. 28.5. Конструкция трансформатора с Ш-образным магнитопроводом

a_1 и a_2 — толщины первичной и вторичной обмоток, м; h — высота вторичной обмотки, м; δ — расстояние между обмотками, м; u — средняя окружность потока рассеяния вторичной обмотки, м:

$$u = \pi \left(D_{2\text{нар}} + \frac{\delta}{4} \right);$$

$D_{2\text{нар}}$ — наружный диаметр вторичной обмотки, м (рис. 28.4).

Для одной катушки ТТ типа ТШ x_{2T} , Ом, приближенно:

$$x_{2T} \approx 8\pi f \omega_2^2 (a + b),$$

где a и b — стороны сечения магнитопровода, м.

Для ТТ с concentрическими обмотками и Ш-образным магнитопроводом (рис. 28.5)

$$x_{2T} = 4\pi^2 f \omega_2^2 u \delta / h_{\mu},$$

где h_{μ} — длина средней линии потока рассеяния вторичной обмотки по воздуху.

5. Расчет погрешности производится для $I_2 = 0,1; 0,2; 1; 1,2$ $I_{2\text{ном}}$ при $Z_2 = Z_{2\text{ном}}$ и $\cos \varphi_2 = \cos \varphi_{2\text{ном}}$.

Последовательность расчета

$$Z_{\text{вТ}} = \sqrt{(R_2 + r_{2T})^2 + (X_2 + x_{2T})^2};$$

$$\alpha = \arctg \frac{X_2 + x_{2T}}{R_2 + r_{2T}}; \quad E_2 = I_2 Z_{\text{вТ}};$$

$$B_m = E_2 / 4,44 f S_c \omega_{2\text{ном}}.$$

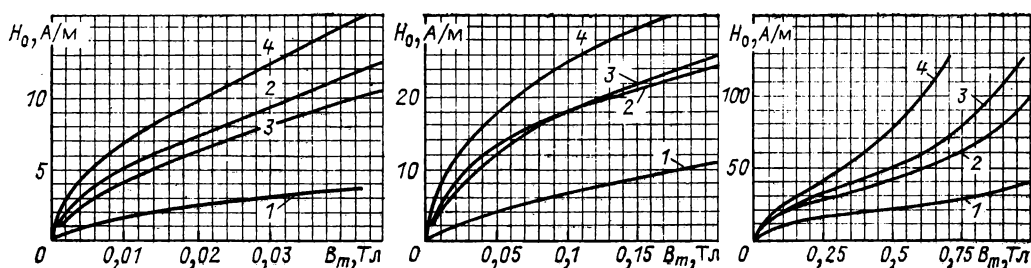
Кривые зависимостей $B_m = f(H_0)$ и $\psi = f(H_0)$ для наиболее ходовых материалов представлены на рис. 28.6—28.8. Кривые рис. 28.6—28.8 получены на реальных образцах собранных магнитопроводов из различных марок стали. Для определения угла потерь ψ вначале по индукции B_m определяют напряженность поля H_0 , после чего находят ψ по рис. 28.8.

$$I_0 \omega_1 = H_0 \pi \frac{D_1 + D_2}{2};$$

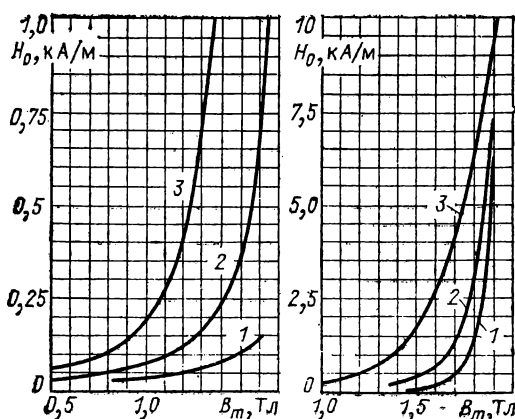
$$\Delta I \% = - \frac{I_0 \omega_1}{I_1 \omega_1} \sin(\alpha + \psi) \cdot 100 +$$

$$+ \frac{\omega_{2\text{ном}} - \omega_2}{\omega_{2\text{ном}}} 100; \quad \frac{\omega_{2\text{ном}} - \omega_2}{\omega_{2\text{ном}}} 100 = \Delta \omega \%;$$

$$\delta' = 3440 \frac{I_0 \omega_1}{I_1 \omega_1} \cos(\alpha + \psi).$$

Рис. 28.6. Кривые намагничивания (H_0 — действующее значение):

1 — отожженные ленточные магнитопроводы из стали 3411; 2 — отожженные ленточные магнитопроводы из стали 1511 и 1512; 3 — отожженные сердечники из Г-образных штампованных пластин из стали 1511 и 1512; 4 — то же неотожженные магнитопроводы

Рис. 28.7. Кривые намагничивания при больших индукциях (H_0 — действующее значение):

1 — магнитопровод ленточный из 3411; 2 — магнитопровод ленточный из стали 1511 или 1512; 3 — магнитопровод штампованный из стали 1511—1512

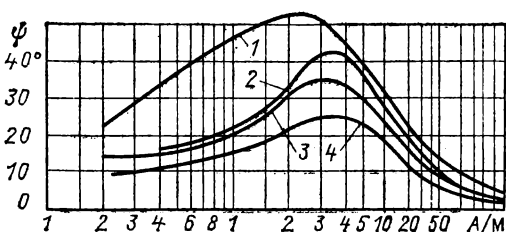


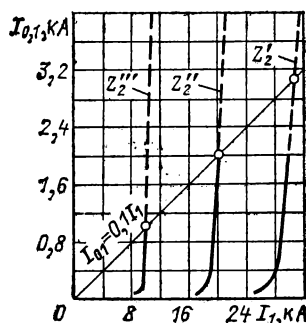
Рис. 28.8. Кривые зависимости угла потерь от действующего значения удельной МДС:

1 — для отожженных ленточных магнитопроводов из стали 3411; 2 — для отожженных ленточных магнитопроводов из стали 1511 и 1512; 3 — для отожженных магнитопроводов из Г-образных штампованных пластин стали марки 1511 и 1512; 4 — то же неотожженных

Зависимости $B_m = f(H_0)$ и $\psi = f(H_0)$ в виде подробных таблиц даны в [28.17].

6. Расчет предельной кратности K_b , K_{10} ведем по методике [28.2].

а) Строится характеристика холостого хода $E_2 = f(I_{02})$. Задают индукцию $B_m = 0,3 \div 1,9$ Тл. По кривым намагничивания рис. 28.7

Рис. 28.9. Зависимость намагничивающего тока, приведенного к первичной обмотке, от первичного тока $I_{01} = f(I_1)$ для трех значений нагрузки $Z_2' < Z_2'' < Z_2'''$

определяют H_0 . Ток $I_{02} = H_0 / w_2$. Если на рис. 28.7 нет кривой для взятого материала, то можно воспользоваться таблицами § 16.3.

$$E_2 = 4,44 f w_2 B_m S_c.$$

б) При нагрузке Z_2 и $\cos \varphi_2 = 0,8$ находят полное сопротивление вторичной цепи:

$$Z_{вт} = \sqrt{(r_{2т} + 0,8Z_2)^2 + (x_{2т} + 0,6Z_2)^2}.$$

в) Задаваясь различными значениями первичного тока I_1 , определяют соответствующий вторичный ток $I_2 = I_1 / K_{ном}$ (без учета токовой погрешности) и ЭДС вторичной цепи $E_2 = I_2 Z_{вт}$. По значению E_2 и $E_2 = f(I_{02})$ находят ток I_{02} и приводят этот ток к первичной обмотке $I_{01} = I_{02} K_{ном}$. Расчет I_{01} проводят для ряда значений тока I_1 . Строят кривую $I_{01} = f(I_1)$.

г) Проводят расчет пункта «в» для ряда значений Z_2 , в том числе и $Z_2 = Z_{2ном} = Z_2$.

д) Строят кривые п.п. «в» и «г» в одной системе координат — рис. 28.9.

е) Поскольку при K_{10} ток намагничивания I_{01} , приведенный к первичной обмотке $I_{01} = 0,1 I_1$, проводят прямую, изображающую эту зависимость (рис. 28.9). Пересечение этой прямой с кривыми дает точки, определяющие ток I_1 , при котором полная погрешность равна 10 %. Предельная кратность определяется формулой $K_{10} = I_1 / I_{1ном}$. Аналогично рассчитывается K_b . При глубоком насыщении кривая вторичного тока сильно искажена. Методика расчета вто-

Рис. 28.14. Осциллограмма токов, ЭДС и потокосцепления при глубоком насыщении ТТ (отношение индукции насыщения к расчетной 0,4); $\cos \Phi_2 = 1$; $f_F = -40\%$ (погрешность по току)

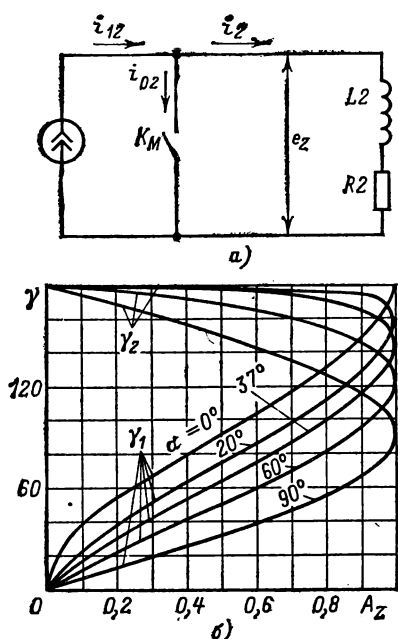


Рис. 28.15. К расчету погрешности при глубоком насыщении:

a — схема замещения ТТ при ПХН аппроксимации характеристики намагничивания; *б* — кривые для определения углов γ_1 и γ_2

аппроксимацию кривой намагничивания. В этом случае для расчета применяется схема замещения рис. 28.15. До момента насыщения ключ K_M разомкнут, ток намагничивания i_{02} равен нулю, приведенный первичный ток i_{12} равен вторичному i_2 . В момент насыщения магнитопровода ключ K_M замыкается. При этом $i_{12} = i_{02}$ и во вторичной цепи течет ток

$$i_2 = i_{2\text{нас}} e^{-t/T_2},$$

где

$$T_2 = \frac{x_{2T} + X_2}{\omega(r_{2T} + R_2)};$$

$i_{2\text{нас}}$ — ток в момент насыщения. Чем больше T_2 , тем медленнее затухает вторичный ток i_2 . Этот режим длится до тех пор, пока магнитопровод снова не войдет в ненасыщенную зону.

В [28.2] разработана методика, которая позволяет определить угол насыщения γ_1 и угол выхода из насыщения γ_2 (рис. 28.14) по кривым рис. 28.15, б, если известны угол сдвига фаз α вторичной цепи и коэффициент A_z :

$$\alpha = \arctg \frac{x_{2T} + X_2}{r_{2T} + R_2}; \quad A_z = \frac{B_s}{B_{\text{расчт}}};$$

$$B_{\text{расчт}} = \frac{I_2 Z_2}{4,44 f \omega_0 S_c}.$$

Поскольку углы γ_1 и γ_2 определяют форму кривой вторичного тока, можно определить действующее и среднее значения вторичного тока, коэффициенты формы кривых вторичного и намагничивающего токов, коэффициенты нелинейных искажений, первые гармоники и

другие величины [28.2]. Углы γ_1 и γ_2 однозначно зависят от α и A_z , и появляется возможность все погрешности ТТ сразу же выразить через α и A_z с помощью универсальных характеристик [28.2].

На рис. 28.16, а представлена зависимость погрешности по действующей МДС

$$\left(\frac{I_2 \omega_2 - I_1 \omega_1}{I_1 \omega_1} 100 \right)$$

от α и A_z . Если витковая коррекция $\Delta \omega \% = 0$, то эта погрешность равна погрешности по току. На рис. 28.16, б представлена зависимость полной погрешности $\epsilon\%$ от α и A_z при $\Delta \omega \% = 0$. На рис. 28.16, в представлена универсальная характеристика угловой погрешности по первой гармонике. Под угловой погрешностью здесь понимается угол между моментами прохождения через нуль кривой первичного тока и первой гармоники вторичного тока. Рассмотренный метод дает хорошие результаты на реальных ТТ при $A_z < 0,95$.

28.4. РАБОТА ТТ В ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ

В переходном режиме в первичном токе ТТ может возникнуть аperiodическая составляющая, затухающая с постоянной времени $T_1 = L_1/R_1 = 0,05 \div 0,4$ с. В этом случае в намагничивающем токе, кроме периодической составляющей $i_{\text{опер}}$, возникает значительная аperiodическая составляющая $i_{\text{оапер}}$. Для ненасыщающегося ТТ ($\mu_r = \text{const}$) при наличии полной аperiodической составляющей в первичном токе и чисто активном сопротивлении вторичной цепи аperiodическая составляющая намагничивающего тока равна [28.8]:

$$i_{\text{оа}} = i_{\text{оапер}} = \frac{I_{\text{перм}} T_1}{T' - T_1} (e^{-t/T'} - e^{-t/T_1}),$$

где T' — постоянная времени ТТ, равная $L_0/(r_{2T} + R_2)$; L_0 — индуктивность ветви намагничивания; $I_{\text{перм}}$ — амплитуда периодической составляющей первичного тока. Все токи приведены к первичной обмотке.

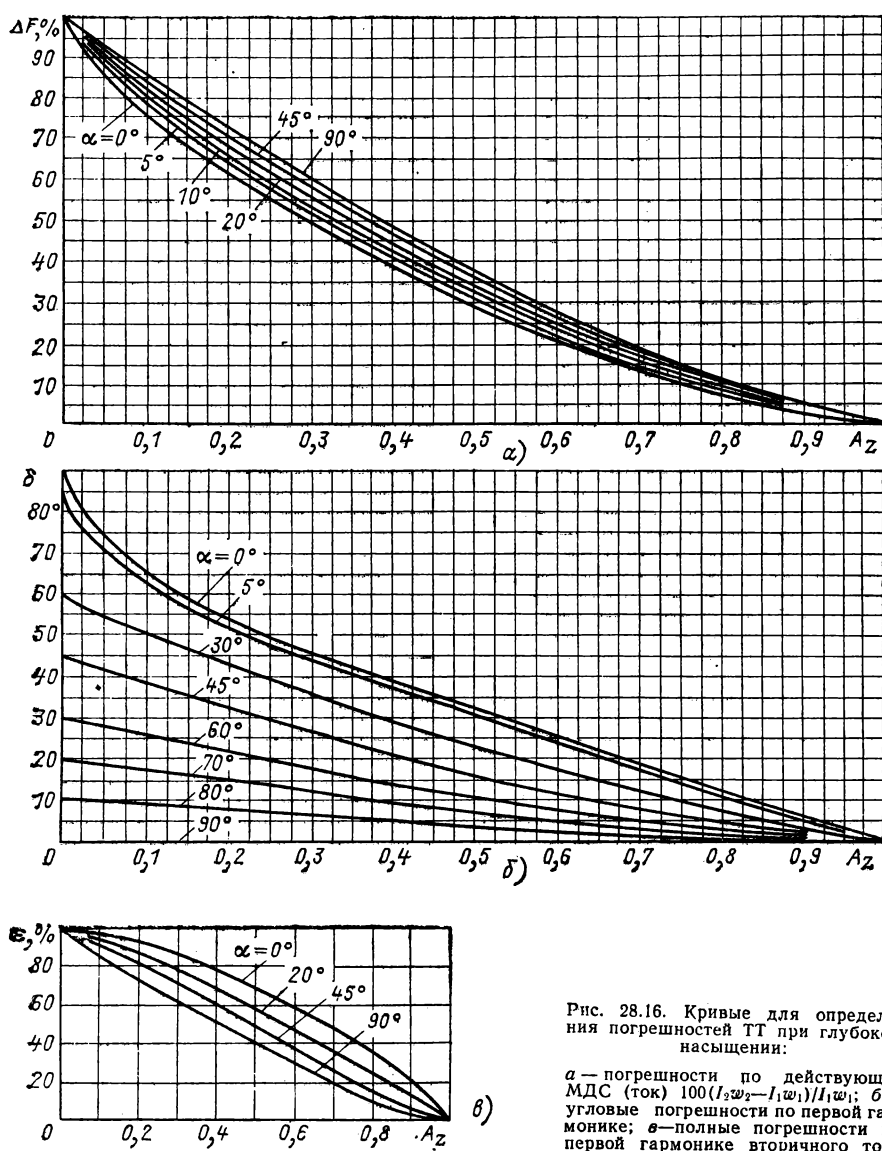
На рис. 28.17 представлена зависимость $i_{\text{оа}}$ во времени. Там же показаны i_{1a} и i_{2a} — аperiodические составляющие первичного и вторичного токов. В момент $t_0 = \frac{T' T_1}{T' - T_1} \ln \frac{T_1}{T'}$ ток $i_{\text{оа}}$ достигает максимума $I_{\text{оам}}$, а погрешность в передаче аperiodической составляющей $\left(\Delta I \% = \frac{i_{2a} - i_{1a}}{i_{1a}} 100 \right)$ равна 100 % [28.8].

Периодическая составляющая намагничивающего тока равна:

$$i_{\text{опер}} = \frac{I_{\text{перм}}}{\sqrt{1 + (\omega T')^2}} \sin \omega t = I_{\text{оперм}} \sin \omega t.$$

На рис. 28.18 даны зависимости $I_{\text{оам}}/I_{\text{оперм}}$ и $I_{\text{оам}}/I_{\text{перм}}$ от постоянной времени T' [28.8].

При малом T' отношении $I_{\text{оам}}/I_{\text{перм}}$ достигает больших значений. Это значит, что аperiodическая составляющая тока передается во вторичную цепь с большой погрешностью, так как $\Delta I_a = I_{\text{оа}}/I_{\text{перм}}$. При большой T' наблюда-



ется, с одной стороны, уменьшение $I_{0am}/I_{1перт}$ (уменьшение погрешности), с другой, возрастание кратности $I_{0am}/I_{0перт}$, которая при $T' = 10$ с достигает 30. Каждая из составляющих

намагничивающего тока создает свою индукцию в магнитопроводе:

$$\dot{B}_{перт} = I_{0перт} \frac{\mu}{l} \omega_2;$$

$$B_{ам} = I_{0ам} \frac{\mu}{l} \omega_2;$$

$$B_{резт} = B_{перт} + B_{ам}.$$

В результате в магнитопроводе появляется аperiodическая составляющая индукции, которая в 30 раз больше, чем периодическая. Из-за наличия большой аperiodической составляющей индукции наступают глубокое насыщение магнитопровода и значительное искажение вторичного тока [28.8, 28.11].

Следует отметить, что электротехнические стали имеют высокую остаточную индукцию

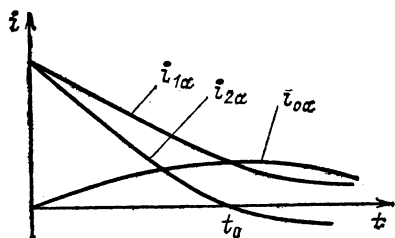


Рис. 28.17. Изменение во времени аperiodической составляющей первичного, вторичного токов и тока намагничивания

оценки работы ТТ в этом режиме используются кривые предельной кратности.

При заданной вторичной нагрузке Z_2 предельная кратность трансформатора должна быть выше расчетной кратности $m_{расч}$ (отношение тока короткого замыкания, при котором срабатывает защита, к номинальному току ТТ). Трансформаторы, комплектуемые для дифференциальной защиты, должны иметь одинаковую предельную кратность при сквозном токе короткого замыкания. Значение $m_{расч}$ зависит от принципа действия защиты (см. разд. 44).

Сопротивление нагрузки Z_2 должно быть не более $Z_{2 ном}$ и для простейшей однофазной схемы включения ТТ равно, Ом:

$$Z_2 = \sqrt{(\Sigma X_{приб} + x_{2т})^2 + (\Sigma R_{приб} + R_{конт} + R_{пров})^2},$$

где $\Sigma X_{приб}$ — суммарное реактивное сопротивление всех приборов нагрузки, Ом; $\Sigma R_{приб}$ — суммарное активное сопротивление приборов нагрузки, Ом; $R_{конт} = 0,05 + 1$ Ом — сопротивление контактных соединений; $R_{пров}$ — сопротивление проводов.

Сечение соединительных проводов при данной длине l , м, определяется из выражения

$$q = \rho l / R_{пров},$$

где q — сечение провода, мм²; ρ — удельное сопротивление проводов, мкОм·м.

По условиям механической прочности сечение медных проводов должно быть не менее 1,5 мм², а алюминиевых — не менее 2,5 мм².

При соединении ТТ в трехфазные группы по различным проводам протекают различные токи. Поэтому для расчета сечения соединительных проводов необходимо выбрать такой режим, при котором нагрузка на ТТ получается наибольшей [28.6].

7. При использовании встроенных ТТ, имеющих несколько магнитопроводов с обмоткой, часто возникает необходимость увеличения либо допустимой вторичной нагрузки ТТ (велика длина соединительных проводов), либо вторичного тока в нагрузке до номинального значения (из-за того, что номинальный ток установки значительно ниже первичного тока трансформатора).

В первом случае вторичные обмотки соединяются согласно-последовательно. Если соединяются два ТТ последовательно, то вторичная ЭДС возрастает в 2 раза, что дает возможность увеличить в 2 раза нагрузку Z_2 .

Соединяемые ТТ должны быть однотипными и иметь одинаковые вторичные токи, равные номинальному току нагрузки. Во втором случае вторичные обмотки соединяются согласно-параллельно. Ток в нагрузке равен сумме вторичных токов ТТ. Внутренние и внешние параметры параллельно соединяемых ТТ должны быть одинаковыми.

Встроенные ТТ могут иметь вторичную обмотку с отводами. Изменяя число вторичных витков, можно изменять номинальный коэффициент трансформации. Следует отметить, что в том случае, когда используемая часть вторичной обмотки неравномерно располагается по тору магнитопровода, возникает сопротивление рассеяния вторичной обмотки, которое может

быть соизмеримо с ее активным сопротивлением (см. рис. 28.3). При уменьшении числа вторичных витков погрешность ТТ возрастает.

28.6. КАСКАДНЫЕ ТТ

При напряжении $U_{ном} > 330$ кВ конструкция ТТ нормального исполнения получается очень громоздкой и тяжелой [28.4]. Бумажно-масляная изоляция имеет значительную толщину, и допустимая средняя напряженность электрического поля в изоляции снижается. Для уменьшения габарита и массы применяют каскадные ТТ. На рис. 28.19, а представлена схема двухкаскадного ТТ типа ТФНК-500 на напряжение 500 кВ, который имеет две ступени: В (верхнюю) и Н (нижнюю). Каждая ступень имеет изоляцию, рассчитанную для работы при напряжении 250 кВ. Первая ступень В имеет один магнитопровод с обмоткой и трансформирует ток I_1 в ток 20 А. Вторичная обмотка ступени В включена на первичные обмотки четырех ТТ ступени Н с коэффициентом трансформации 20/1.

Схема замещения каскадного ТТ представлена на рис. 28.19, б. Результирующая токовая

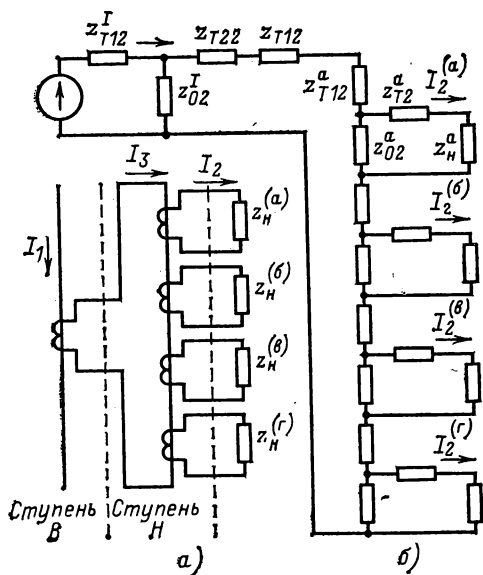


Рис. 28.19. Каскадный ТТ на напряжение 500 кВ (ТФНК-500):

а — принципиальная схема; б — схема замещения

и угловая погрешности ТТ равны сумме соответствующих погрешностей ступеней. Работа каскадного ТТ в режиме глубокого насыщения рассмотрена в [28.11].

Ступени каскадного ТТ имеют звеньевую конструкцию (типа ТФН). Каждая ступень ТТ конструктивно выполнена отдельно и позволяет перевозить аппарат по частям.

Недостатки каскадных ТТ:

а) Каскадная схема повышает погрешность ТТ и снижает его предельную кратность, так как во вторичной цепи верхней ступени включено значительное сопротивление нагрузки в

виде четырех ТТ и реактивного сопротивления первичной обмотки нижней ступени.

б) Изменение нагрузки любого из ТТ нижней ступени влияет на режим работы верхней ступени. Таким образом, существует взаимное влияние четырех выходных каналов нижней ступени.

в) В переходном режиме наблюдается быстрое насыщение и сильное искажение формы вторичного тока [28.11].

28.7. МАГНИТНЫЕ ТТ ИНДУКЦИОННОГО ТИПА

В ТТ с $U_{ном} > 35$ кВ значительную часть стоимости аппарата составляет стоимость изоляции между первичной и вторичной обмотками. Предложен ряд конструкций магнитных ТТ (МТТ), в которых используется воздушная изоляция между проводником, обтекаемым током, и измерительной обмоткой. Магнитный поток, создаваемый измеряемым током, наводит в измерительной обмотке ЭДС. Приборы релейной защиты включают на эту ЭДС. По сути дела мы имеем здесь преобразование измеряемого тока в напряжение. Наводимая в измерительной обмотке ЭДС зависит от взаимной индуктивности между проводом и обмоткой M_d :

$$M_d = M_e K_l K_\alpha,$$

где K_l учитывает расстояние от провода до обмотки ($K_l = 1$ при расстоянии $l = 1$ м); K_α зависит от угла ориентации обмотки МТТ ($K_\alpha = 1$, когда наводимая ЭДС максимальна); M_e — единичная взаимная индуктивность (при $K_l = 1$, $K_\alpha = 1$). Значение M_e зависит только от конструкции и размера МТТ. Напряжение холостого хода

$$U_{2x} = I_1 K_e K_l K_\alpha \frac{\omega}{314},$$

где I_1 — ток, кА; K_e — единичный коэффициент преобразования — это ЭДС, наводимая в обмотке при $I_1 = 1$ кА, $K_l = K_\alpha = 1$ и $\omega = 314$ рад/с.

Вторичная мощность в установившемся режиме

$$S_2 = 4I_1^2 S_{уд} (K_l K_\alpha) \frac{Z_d Z_n}{Z_\Sigma^2},$$

где $S_{уд}$ — удельная мощность, В·А/(кА)², снимаемая с МТТ при $K_\alpha = 1$, $K_l = 1$, токе $I_1 = 1$ кА и сопротивлении нагрузки $Z_n = Z_d$; согласно [28.2] $S_{уд} = 0,25 K_e^2 / Z_d$ и зависит только от конструктивных данных МТТ; Z_d — полное сопротивление цепи обмотки МТТ, Ом; $Z_d = \sqrt{r_d^2 + x_d^2}$; Z_n — сопротивление нагрузки; Z_Σ — суммарное сопротивление обмотки МТТ и нагрузки.

Поскольку вблизи МТТ могут располагаться другие проводники с током (например, проводники двух оставшихся фаз), то в МТТ наводится ЭДС от этих токов, возникает помеха,

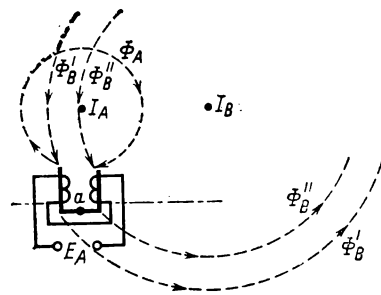


Рис. 28.20. Дифференциальный МТТ

которая может быть значительной. Напряжение холостого хода с учетом помехи

$$U_{2x} = M_d \frac{di_i}{dt} + M_n \frac{di_n}{dt} = M_d \left(\frac{di_i}{dt} + K_n \frac{di_n}{dt} \right),$$

где i_n — ток помехи; M_n — взаимная индуктивность с проводом, создающим помеху. Для борьбы с помехой применяют дифференциальный МТТ (рис. 28.20) или специальные компенсирующие МТТ [28.2]. Для уменьшения влияния помехи МТТ должен располагаться возможно ближе к току, который измеряется.

Поток Φ_A (рис. 28.20) от тока I_A проходит по П-образной магнитной системе, и ЭДС, наведенные этим потоком в половинах обмотки, складываются. Потоки Φ'_B и Φ''_B , созданные мешающим проводником с током I_B , создают в половинах обмотки ЭДС, сдвинутые на 180°. В результате ЭДС помехи взаимно компенсируются. Вопросы погрешности МТТ и его использования в релейной защите рассмотрены в [28.2].

28.8. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ТТ

При напряжении 750 кВ и выше габариты и размеры электромагнитного ТТ резко возрастают. Приходится, как правило, применять каскадную схему соединений. Но даже в этом случае ТТ получается тяжелым и громоздким. Поэтому при высоких и сверхвысоких напряжениях необходимо переходить на принципиально новое решение — ТТ с оптико-электронными каналами связи (ОЭТТ) вместо электромагнитных [28.9, 28.17].

Возможны два способа модуляции светового потока — внутренняя и внешняя. На рис. 28.21, а показана обобщенная структурная схема ОЭТТ с внутренней модуляцией светового потока. Измеряемый ток i_n проходит через преобразователь 1, на выходе которого получается напряжение u , пропорциональное току. В промежуточном преобразователе 2 сигнал, подаваемый от блока 1, производит модуляцию напряжения, подаваемого на источник излучения 3. Принцип модуляции может быть различным: амплитудный, когда яркость источника пропорциональна напряжению U , или частотный, когда частота миганий источника излучения пропорциональна току; широтно-импульсная модуляция, при которой соотношение меж-

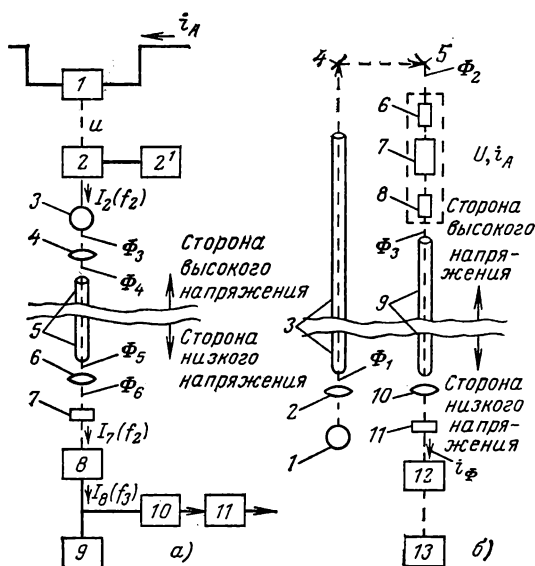


Рис. 28.21. Структурные схемы ОЭТТ:

а — устройство с внутренней модуляцией светового потока; б — устройство с внешней модуляцией светового потока

ду световым сигналом и паузой является функцией тока. Питание преобразователя 2 производится от источника 2'.

Промодулированный световой поток Φ_3 через световой канал связи 4, 5, 6 передается на сторону низкого напряжения. Позиции 4 и 6 — передающий и приемный объективы, 5 — передающая среда — световод. Наиболее совершенным является световод, представляющий собой пучок волокон. Каждое волокно на поверхности покрыто веществом, благодаря которому имеет место полное внутреннее отражение, т. е. луч, отражаясь от внутренней цилиндрической стенки волокна, движется вперед. Для получения необходимого частоты светового потока волокна собираются в пучки диаметром 8—10 мм. При необходимости передавать большое число сигналов несколько световодов объединяются вместе. Верхний и нижний торцы пучка тщательно шлифуются. Для защиты от внешних воздействий световод защищается специальным чулком. Большим достоинством волоконного световода является его высокая электрическая прочность. Он выдерживает напряжение промышленной частоты примерно 100 кВ/м. Световод располагается в полом фарфоровом изоляторе, наполненном газом при небольшом давлении. Большим достоинством гибкого световода является возможность передачи световой информации по сложному пути.

Из объектива 6 световой поток Φ_6 попадает на фотоприемник 7, выходной сигнал которого зависит от параметров светового потока. Если в ОЭТТ применяется частотная модуляция, то сигнал фотоприемника 7 подается через усилитель 8 на выходное устройство 9, воспринимающее сигнал переменной частоты. Для получения на выходе аналогового сигнала — напряжения, пропорционального току, выход-

ной сигнал усилителя 8 подается на преобразователь частота—ток 10. После этого выходной сигнал подается на оконечный усилитель 11.

Обобщенная схема ОЭТТ с внешней модуляцией представлена на рис. 28.21, б. Источник света 1, находящийся на потенциалс земли, посылает световой поток через оптическую систему (объектив 2, световод 3, зеркала 4 и 5) на поляризатор 6. Поляризованный пучок света подается на преобразователь 7.

В качестве преобразователя используется ячейка Фарадея. Магнитооптический элемент в виде цилиндра или параллелепипеда помещается в магнитное поле катушки, по которой протекает измеряемый ток. В качестве магнитооптического вещества могут применяться специальные сорта стекла (тяжелый флинт), ортоферрит иттрия и др.

В зависимости от напряженности, создаваемой током i_d , поворачивается плоскость поляризации. Угол поворота плоскости поляризации

$$\theta = H V l = K_H i_d V l = S_H i_d,$$

где H — напряженность поля, создаваемого катушкой; V — постоянная Верде, характеризующая магнитооптические свойства материала; l — длина пути луча света в элементе; K_H — коэффициент пропорциональности между током i_d и напряженностью магнитного поля H ; S_H — чувствительность преобразователя.

После преобразователя световой поток проходит через анализатор 8.

Интенсивность светового потока за анализатором 8 зависит от угла между плоскостью поляризации света после ячейки Фарадея и плоскостью поляризации анализатора.

Модулированный поток через световод 9 и объектив 10 подается на фотоприемник 11. Ток фотоприемника усиливается в блоке 12, после чего подается на измерительные приборы или исполнительные устройства 13.

Фототок на выходе блока 11 имеет постоянную составляющую $I_{\phi 0}$ и переменную $k I_{\phi m} \sin \omega t$.

Для того чтобы избавиться от постоянной составляющей, световой поток подается на биполяризационный поляризатор, из которого выходят два световых потока, сдвинутых на определенный угол. Эти пучки подаются на дифференциальный усилитель, на выходе которого появляется сигнал, пропорциональный только переменной составляющей.

Внешняя модуляция имеет следующие преимущества: датчик располагается на высоком потенциале и не требует источника питания. Система обладает безынерционностью, что дает возможность измерять как постоянные токи (в системах сверхвысокого напряжения), так и токи высокой частоты, в том числе и импульсные. Недостатком является зависимость эффекта Фарадея от температуры, которую трудно скомпенсировать. Очень трудно поддерживать без вмешательства прозрачность оптических элементов. При прохождении пучком света длинного пути через ряд элементов появляется паразитная шумовая составляющая, определяющая минимально регистрируемый ток.

При внутренней модуляции предпочтительным является метод частотной модуляции,

что дает возможность повысить точность ОЭТТ (до 0,5 %) и выполнить помехоустойчивый аппарат с высокой надежностью.

Большим недостатком всех ОЭТТ является трудность согласования выходного усилителя ОЭТТ с требованиями релейной защиты. Если при номинальном токе мощность устройств релейной защиты, подключенных к ТТ, равна $20 \cdot B \cdot A$, то при 20-кратном первичном токе мощность достигает $20 \cdot 20^2 = 8000 B \cdot A$. Создание усилителя с такой выходной мощностью связано с большими трудностями. Поэтому для ОЭТТ необходимо разрабатывать полупроводниковые устройства защиты с очень малой мощностью потребления.

28.9. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА, ВЫПУСКАЕМЫЕ В СССР

В настоящее время для трансформаторов тока (ТТ) внутренней установки до 35 кВ применяется литая изоляция на основе эпоксидных смол. В этом исполнении выпускаются ТТ на напряжения главным образом 6 и 10 кВ.

На напряжение 6 кВ изготавливаются катушечные ТТ типа ТЛМ-6 (рис. 28.22), малогабаритные, на номинальные первичные токи от 300 до 1500 А. Трансформаторы этого типа представляют собой литой блок из двух магнитопроводов с разным назначением обмоток (для измерения с классами точности 1 для номинальных токов 300 и 400 А и 0,5 для больших номинальных первичных токов и для защиты, имеющие обозначение 10Р). Катушечные ТТ опорной конструкции типа ТОЛК-6 (рис. 28.23) предназначены для встраивания во взрывобезопасные КРУ высокого напряжения на номинальные первичные токи от 50 до 600 А. Первичная обмотка ТТ представляет собой многовитковую катушку на токи до 400 А и одновитковую на ток 600 А. Особенностью данного ТТ является наличие дополнительной обмотки для проверки устройств максимальной токовой защиты, которая должна быть разомкнута в процессе работы ТТ. Для измерения токов от 10 до 400 А применяется встроенный ТТ катушечного типа ТВЛМ-6 (рис. 28.24).

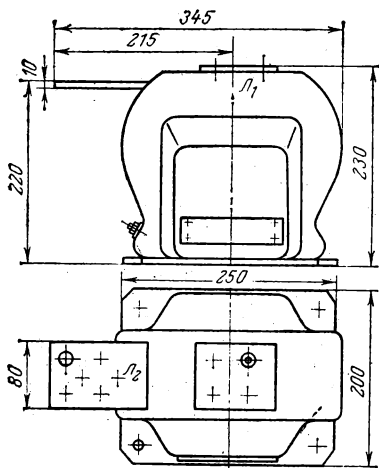


Рис. 28.22. Трансформатор тока ТЛМ-6

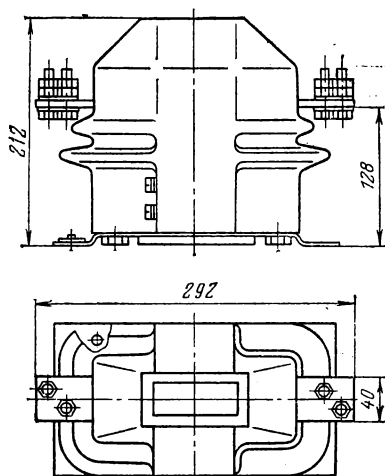


Рис. 28.23. Трансформатор тока ТОЛК-6

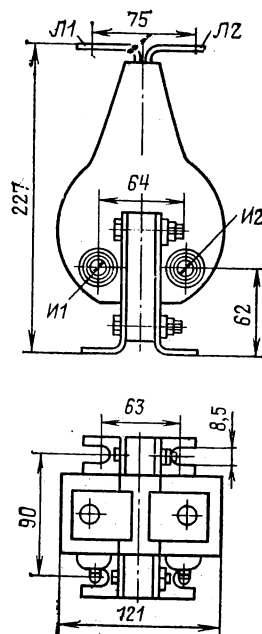


Рис. 28.24. Трансформатор тока ТВЛМ-6

На напряжение 10 кВ выпускаются многовитковые проходные ТТ типа ТПЛ-10 на токи от 30 до 400 А (рис. 28.25), а также усиленные по термической и электродинамической стойкости ТПЛУ-10 на токи от 30 до 100 А; проходные одновитковые типа ТПОЛ-10 на токи от 600 до 1500 А (рис. 28.26); для комплектных распределительных устройств типа ТЛ-10 на токи от 50 до 3000 А (рис. 28.27), в котором один вывод первичной обмотки предназначен для присоединения плоской шины, а второй вывод, расположенный внутри изоляционного стакана, — для подсоединения розеточного контакта выкатной части ячейки КРУ; опорные типа ТОЛ-10 на токи от 50 до 1500 А

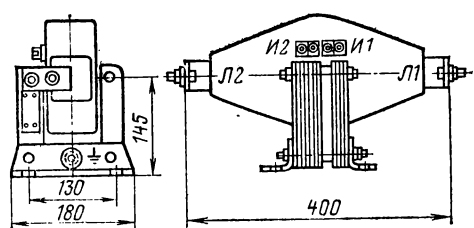


Рис. 28.25. Трансформатор тока ТПЛ-10

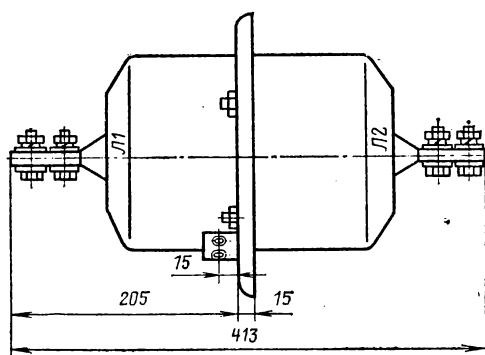


Рис. 28.26. Трансформатор тока ТПОЛ-10

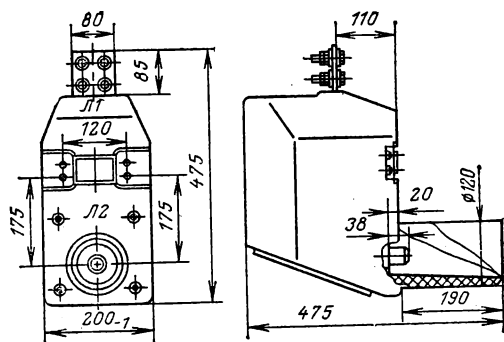


Рис. 28.27. Трансформаторы тока ТЛ-10 на токи 50—400 А (в скобках размеры трансформаторов тока на токи 600—1500 А)

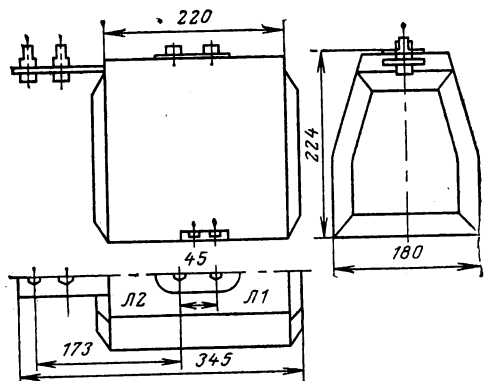


Рис. 28.28. Трансформатор тока ТОЛ-10

(рис. 28.28) с многовитковой первичной обмоткой на токи до 400 А и одновитковой — на токи 600—1500 А; катушечные малогабаритные типа ТЛМ-10 (рис. 28.29) на токи от 50 до 1500 А; опорно-проходные типа ТПЛК-10 на токи от 10 до 1500 А (рис. 28.30).

На напряжение 20 и 35 кВ выпускаются проходные одновитковые ТТ типов ТПОЛ-20 и ТПОЛ-35 (рис. 28.31 и 28.32) на токи от 400 до 1500 А. Для данного типа ТТ для номинального первичного тока 400 А выбраны исполнения 1/10Р и 10Р/10Р, так как получение более

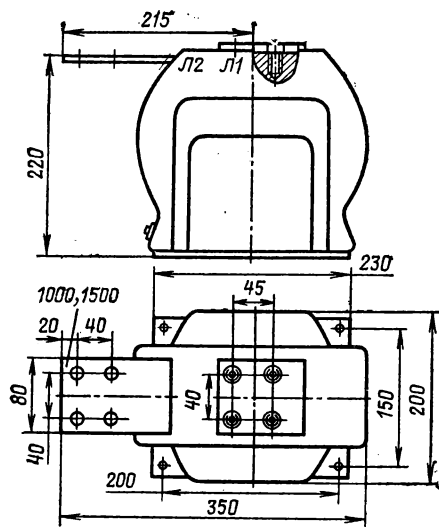
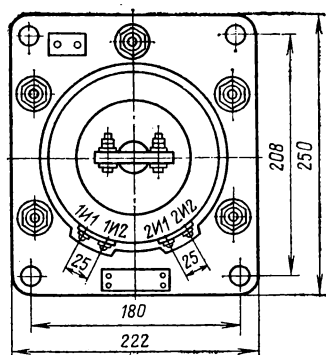


Рис. 28.29. Трансформатор тока ТЛМ-10

высокого класса точности было бы связано с нерациональным увеличением габаритов. Для других номинальных токов ТТ этого типа выпускаются в исполнениях 0,5/10Р и 10Р/10Р.

Быстронасыщающиеся ТТ применяются как источник оперативного переменного тока в цепях защиты для питания отключающих катушек ручных и автоматических приводов выключателей, короткозамыкателей и отделителей, а также в схемах дифференциальной защиты для отстройки от апериодической составляющей тока. Быстронасыщающийся ТТ с

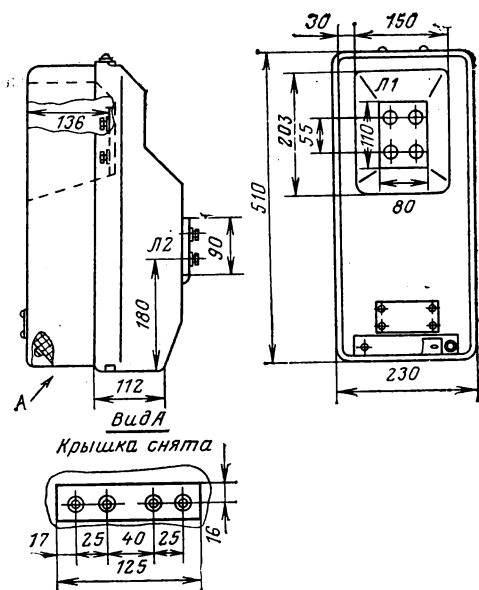


Рис. 28.30. Трансформатор тока ТПЛК-10

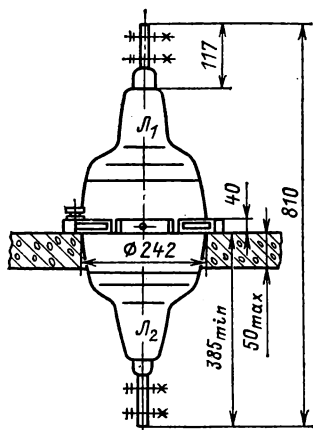


Рис. 28.31. Трансформатор тока ТПОЛ-20

литой изоляцией типа ТШЛ-0,66 используется в схемах с короткозамыкателем и отделителем.

В табл. 28.8, 28.9 приведены технические данные ТТ всех описанных выше типов. На рис. 28.57—28.64 приведены кривые предельных кратностей первичного тока при погрешности 10 % для основных типов ТТ.

В отношении техники безопасности ТТ удовлетворяют требованиям соответствующих стандартов [28.1, 28.16]. В частности, вторичные зажимы выполняются так, чтобы обеспечить возможность наложения на них перемычки до отключения присоединенного прибора.

Для измерения тока в лабораториях и на испытательных стендах промышленных предприятий для напряжения до 35 кВ предназначен ТТ типа ТЛЛ-35, использующий метод компенсации погрешности с помощью подмагничивания током тройной частоты.

На большие номинальные первичные токи применяются проходные и опорные ТТ, в кото-

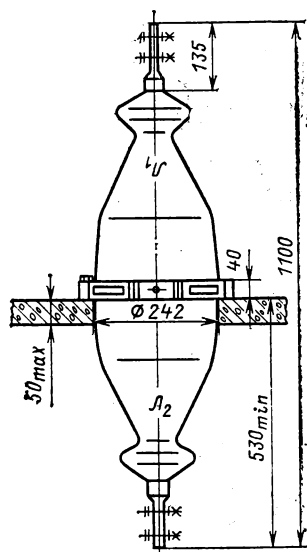


Рис. 28.32. Трансформатор тока ТПОЛ-35

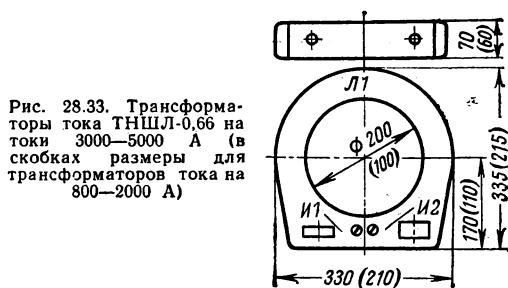


Рис. 28.33. Трансформаторы тока ТНШЛ-0,66 на токи 3000—5000 А (в скобках размеры для трансформаторов тока на 800—2000 А)

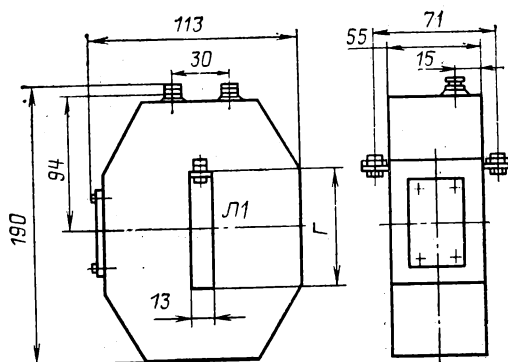


Рис. 28.34. Трансформатор тока ТШН-0,66 на токи 800—1500 А

рых роль первичной обмотки выполняет шина, пропускаемая внутри трансформатора. Электродинамическая стойкость и способность к перегрузке по току определяются шинопроводом.

На напряжение 0,66 кВ и токи от 2000 до 5000 А выпускают ТТ шинный с литой изоляцией ТШЛ-0,66, на токи от 800 до 10 000 А ТТ типа ТНШЛ-0,66 с литой изоляцией (рис. 28.33); на токи от 800 до 1500 А ТТ типа ТШН-0,66 (шинный, навесного типа, рис. 28.34);

Таблица 28.8. Технические данные трансформаторов тока внутренней установки

Тип трансформатора	Варианты исполнения	Номинальный первичный ток, А	3-секундная термическая стойкость (кратность)	Электродинамическая стойкость (кратность)	Номинальная вторичная нагрузка, В·А		Номинальная предельная кратность защитной обмотки	Масса, кг	Цена, руб.
					измерительной обмотки	защитной обмотки			
ТЛМ-6	1/10P 0,5/10P	300; 400 600; 800; 1000; 1500	33*	125*	10	15	20	27	76—81
ТОЛК-6	1; 10P	50 80 100; 150; 200 300; 400; 600	40 40 4,6* 11*	340 340 26* 26*	30	30	5,5	11,3	85
ТВЛМ-6	1; 10P	10; 20; 30; 50; 75; 100 150; 200; 300; 400	20	350 52*	15	15	4,5	5,3	8,3
ТПЛ-10	10P; 0,5/10P; 10P/10P	30; 50; 75; 100; 150; 200 300 400	45 45 35	250 175 165	10	15	13	10—19	19—25,5
ТПЛУ-10	10P; 0,5/10P; 10P/10P	30; 50; 75; 100	60	250	10	15	13	10—19	19,3—26,5
ТПОЛ-10	0,5/10P	600; 800 1000 1500	32 27 18	81 69 45	10	15	19; 23 20 25	18	28
ТЛ-10	0,5/10P	50; 100; 150; 200; 300; 400 600; 800 1000 1500; 2000; 3000	50 50 40* 40*	51* 128* 128* 128*	10 20	15 30	15 17 20 15; 20; 15	47	155—195
ТОЛ-10	0,5/10P; 10P/10P	50 100; 150; 200 300; 400 600; 800 1000; 1500	50 50 18,4* 23* 36*	350 52* 100* 100* 100*	10	15	10	25	100
ТЛМ-10	0,5; 10P 0,5/10P	50; 100; 150 200 300; 400 600; 800 1000; 1500	50 50 18,4* 23* 26*	350 260 100* 100* 100*	10	15	15 10	27	58—68
ТПЛК-10	0,5/10P 10P/10P	10; 15; 30; 50; 100; 150; 200; 300; 400 600; 800 1000; 1500	47	250 74,5* 74,5* 74,5*	10	15	12 17 20	47	165
ТПОЛ-20	1/10P; 10P/10P 0,5/10P; 10P/10P	400 600 800; 1000 1500	40	120*	20	15 20 30; 50 50	13 18 24 26	43	170
ТПОЛ-35	1/10P 10P/10P 0,5/10P; 10P/10P	400 600 800; 1000 1500	40 40 40 35	100*	20	15 20 30; 50 50	13 18 24 26	55	180

Продолжение табл. 28.8

Тип трансформатора	Варианты исполнения	Номинальный первичный ток, А	3-секундная термическая стойкость (кратность)	Электродинамическая стойкость (кратность)	Номинальная вторичная нагрузка, В·А		Номинальная предельная кратность защитной обмотки	Масса, кг	Цена, руб.
					измерительной обмотки	защитной обмотки			
ТЛЛ-35	0,1	5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 100; 200; 300; 400; 600; 800; 1000; 1500; 2000; 3000	4	10	15	—	—	86	—
ТШЛ-0,66	0,5	2000; 3000 4000; 5000	20; 14 12	—	15	—	8	9—14	26—46
ТНШЛ-0,66	0,5	800 1000 1500; 2000 300 4000; 5000 8000; 10000	25 25 25 75 75 75	—	20	—	7 10 11 11 12 2	—	10—147
ТНШ-0,66	0,5	300; 400 600; 800; 1000; 1500	—	—	5 10	—	—	2,7	18
ТШМС-0,66	0,5; 10Р	2000; 3000; 4000; 5000; 6000 8000	25 20	—	40	60	3	3,9—9 15	39—63
ТНШ-0,66	3	15000; 25000	2,5	—	50	—	2	52	170; 335
ТШЛ-10	0,5/10Р 10Р/10Р	2000; 3000; 4000; 5000	35	—	20	30	25	49	—
ТПШЛ-10	0,5/10Р 10Р/10Р	4000; 5000	35	—	20	30	23	43	89
ТЛШ-10	0,5/10Р	2000; 3000	42*	81*	20	30	—	26	56
ТШВ-15	0,2/10Р	6000; 8000	20	—	30	30	15	50—93	315
ТШЛО-20	10Р	400	19	200	—	20	15	23	100
ТШ20	0,2; 10Р	8000; 10 000; 12 000	160*	—	30	30	9	41—49	—
ТШ24	0,2; 10Р	20 000	—	—	100	100	8	105	—
ТШВ24	0,2; 10Р	24 000; 30 000	6	—	100	100	5; 6	106; 115	1200
ТВГ24	0,5/10Р/10Р 10Р/10Р/ 10Р	6000 10 000; 12 000; 15 000	—	—	30 40	30 40	6 4	—	1400
ТВ10	0,5	6000	40	—	20	—	3	14	60
ТВТ10	0,5	5000; 6000; 12 000	28	—	30	—	10; 12; 24 15; 16; 78	60—140	

Продолжение табл. 28.8

Тип трансформатора	Варианты исполнения	Номинальный первичный ток, А	3-секундная термическая стойкость (кратность)	Электродинамическая стойкость (кратность)	Номинальная вторичная нагрузка, В·А		Номинальная предельная кратность защитной обмотки	Масса, кг	Цена руб.
					измерительной обмотки	защитной обмотки			
ТВ35	0,5; 1; 10Р	200; 300; 600; 1500; 2000; 3000	8—200*	—	10—40	10—40	2—30	15—35	20
ТВТ35	0,5; 1; 10Р	200; 300; 600; 1000; 3000; 4000	28	—	10—40	15—40	5—24	16—80	62—165
ТВ110	0,5; 1; 10Р	200; 300; 600; 1000; 2000	20—125*	—	10—50	10—60	5—50	96—103	130
ТВТ110	1; 10Р	300; 600; 1000; 2000	25	—	30—50	10—50	12—24	42—122	79—175
ТВТ150	0,5; 1; 10Р	600; 1000; 2000	25	—	10—60	10—40	22	212—220	85—340
ТВ220	0,5; 1; 10Р	600; 1000; 2000; 3000	63—250*	—	10—50	10—50	10—50	143—157	170
ТВТ220	0,5; 1; 10Р	600; 1000; 2000; 4000	25	—	30—100	30—60	24	145—155	20—270
ТВТ500	1; 10Р	200; 750; 1500; 2000	14—20	—	20—100	20—100	10—25	108—217	205—335
ТВТ750	0,5; 1; 10Р	2000; 3000	14	—	20—100	20—100	10—20	100; 117	240
ТВТ1150	1; 10Р	4000	15	—	40	40	10	237	490

* Термическая и электродинамическая стойкости в килоамперах.

Таблица 28.9. Технические данные трансформаторов тока наружной установки

Тип трансформатора	Варианты исполнения	Номинальный первичный ток, А	Номинальная вторичная нагрузка, В·А		Номинальная предельная кратность при номинальной нагрузке	3-секундная термическая стойкость (кратность)	Электродинамическая стойкость (кратность)	Масса, кг	Цена, руб.
			измерительной обмотки	защитной обмотки					
ТФЗМ35А	0,5/10Р	15—600 800—1000	50	20	28	30	200 130	250	250
ТФЗМ35Б-I	0,5/10Р	15—600 800—1000 1500—2000	30	30	20	50 35 35	200 130 70	350	365
ТФЗМ35Б-II	0,5/10Р/10Р	500; 1000 2000; 3000	30	50	18	49* 57*	125* 145*	430	420—640
ТФЗМ110Б-II	0,5/10Р/10Р	750—1500; 1000—2000	20	20	30	34	100	840	810
ТФЗМ150А, Б-I	0,5/10Р/10Р/10Р	600—1200 1000—2000	40	50	15	23	87	1060	930; 1200
ТФЗМ150Б-II	0,5/10Р/10Р/10Р	300—600—1200	30	50	30; 25; 25	41,6	113	1165	1200
ТФЗМ220Б-III	0,5/10Р/10Р/10Р	500—1000—2000	30	50; 50; 30	15; 15; 10	39,2	83	2260	2100
ТФЗМ220Б-IV	0,5/10Р/10Р/10Р	1000—2000; 1500—3000	30	50; 50; 30	25; 25; 20	39,2	50	2380	2500
ТФРМ330Б	0,5/10Р/10Р/10Р/10Р	500—1000—2000	50	50	20; 15; 18	31,6	99	2050	3100
ТФУМ330А	0,5/10Р/10Р/10Р	500; 1000 2000	30	75	18	39,3 14,6	180 90	4920	4700
ТФМ500Б	0,5/10Р/10Р/10Р/10Р	1000—2000 1500—3000 2000—4000	30	40	18 15 12	15*	120*	6070	14 400
ТФРМ750А	0,5/10Р/10Р/10Р/10Р	1000—2000 1500—3000; 2000—4000	30	40	12	15*	120*	8400	16 200

* Термическая и электродинамическая стойкости в килоамперах.

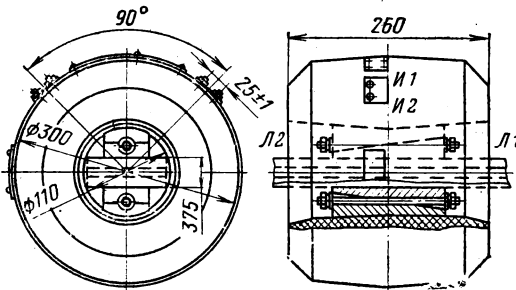


Рис. 28.35. Трансформатор тока ТШЛ-10

на токи от 2000 до 6000 А — ТТ ТШМС-0,66 (шинный, малогабаритный, судовый); на токи 15 000 и 25 000 А — ТТ типа ТНШ-0,66, предназначенный для применения в электропечных установках.

На напряжение 10 кВ и токи от 2000 до 5000 А применяется ТТ типа ТШЛ-10, на токи 4000, 5000 А — проходной ТТ типа ТПШЛ-10 и на токи 2000, 3000 А ТТ типа ТЛШ-10 (рис. 28.35, 28.36).

На напряжение 15 кВ и токи 6000, 8000 А применяется ТТ с воздушной изоляцией ТШВ-15. На напряжение 20 кВ применяются ТТ шинный, опорный типа ТШЛО-20 на ток

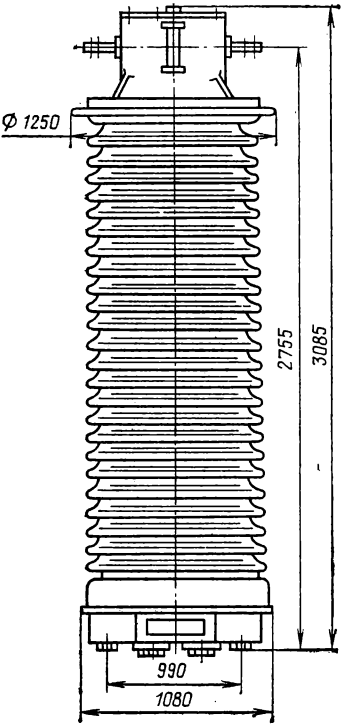


Рис. 28.42. Трансформатор тока ТФЗМ220Б-III

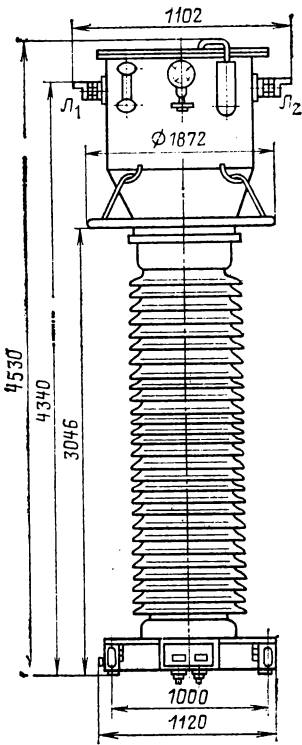


Рис. 28.44. Трансформатор тока ТФРМ330Б

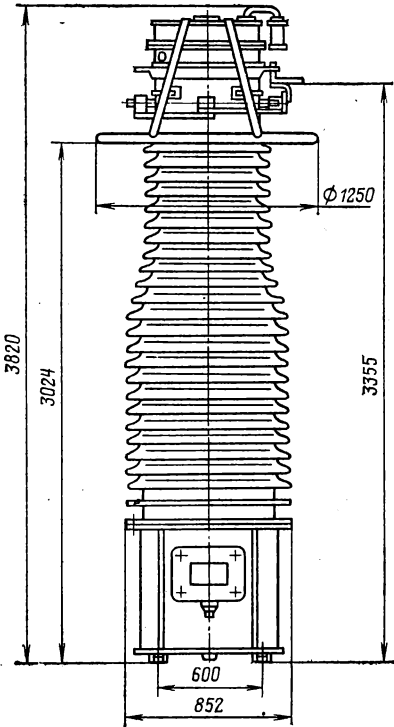


Рис. 28.43. Трансформатор тока ТФУМ330А

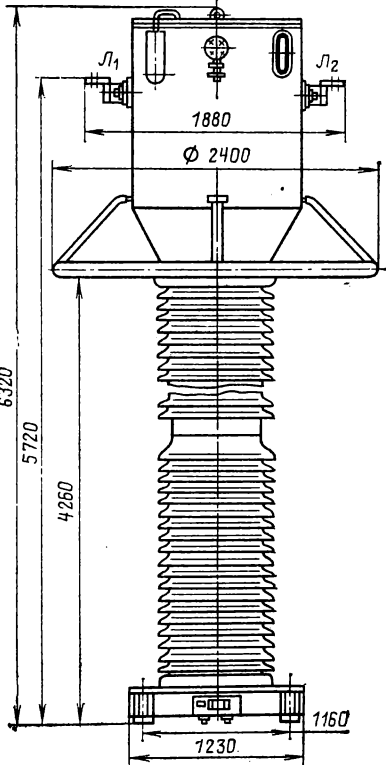


Рис. 28.45. Трансформатор тока ТФРМ500Б

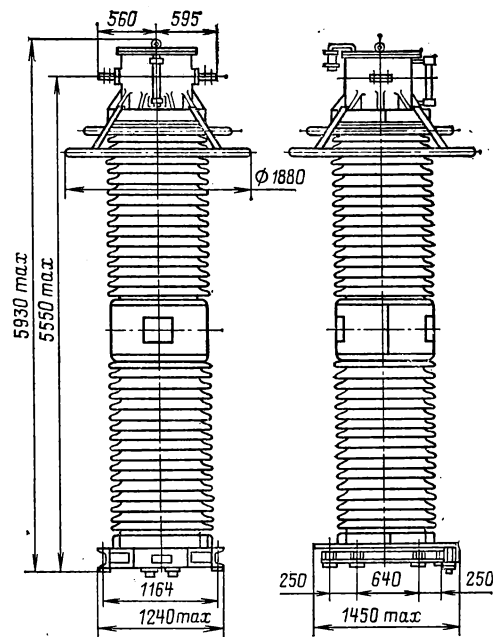


Рис. 28.46. Трансформатор тока ТФЗМ500Б

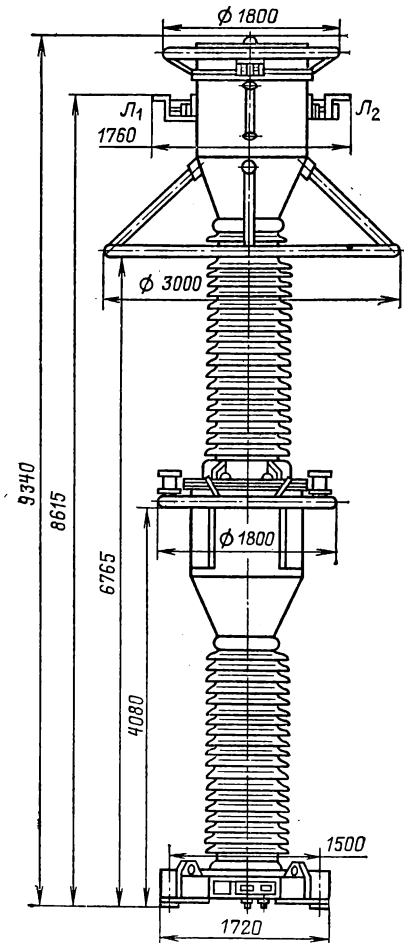


Рис. 28.47. Трансформатор тока ТФРМ750А

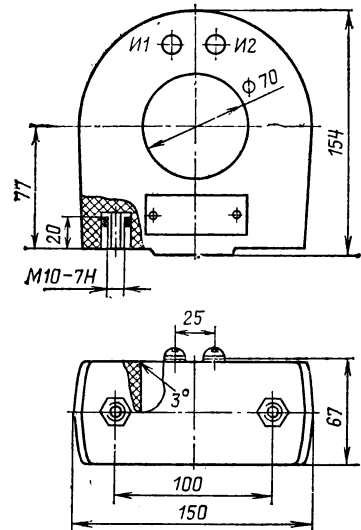


Рис. 28.48. Трансформатор тока ТЗЛМ

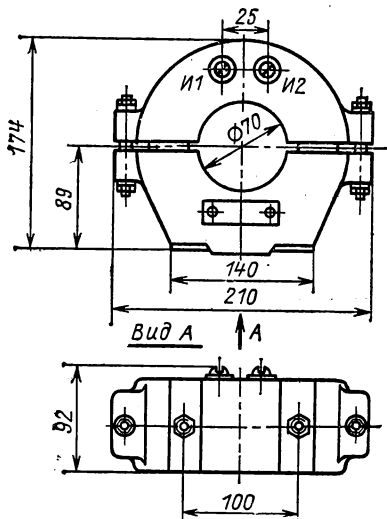


Рис. 28.49. Трансформатор тока ТЗРЛ

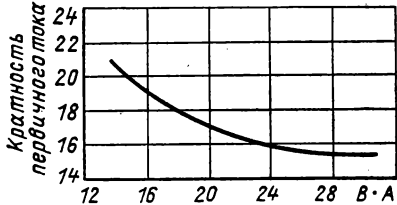


Рис. 28.50. Кривые предельной кратности для трансформатора тока ТЛМ-6

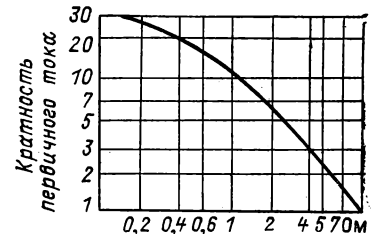


Рис. 28.51. Кривые предельной кратности для трансформатора тока ТПЛ-10

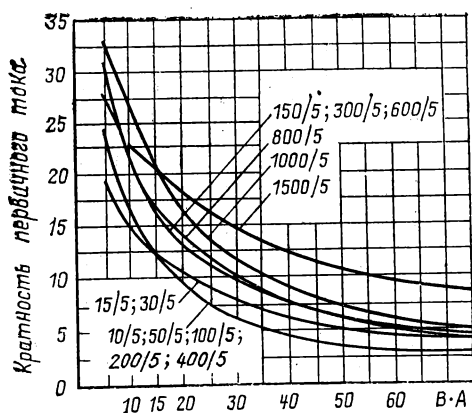


Рис. 28.52. Кривые предельной кратности для трансформатора тока ТПК-10

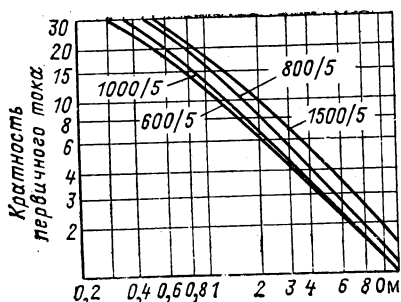


Рис. 28.53. Кривые предельной кратности для трансформатора тока ТПОЛ-10

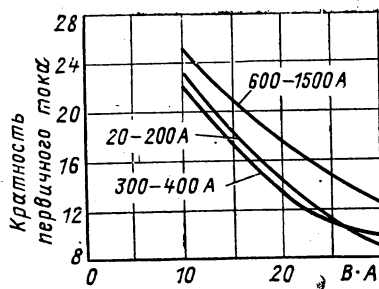


Рис. 28.54. Кривые предельной кратности для трансформатора тока ТЛМ-10

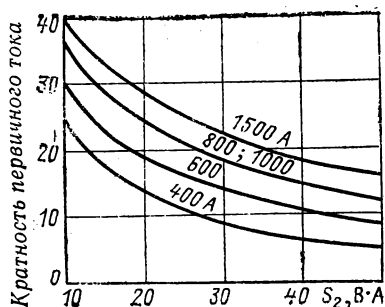


Рис. 28.55. Кривые предельной кратности для трансформаторов тока ТПОЛ-20 и ТПОЛ-35

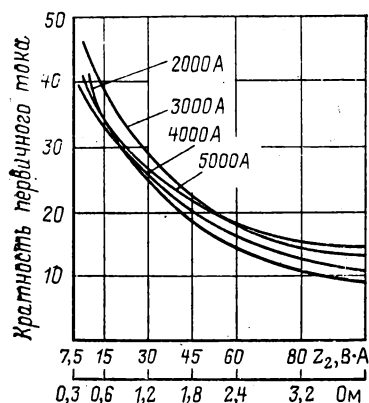


Рис. 28.56. Кривые предельной кратности для трансформатора тока ТПШЛ-10

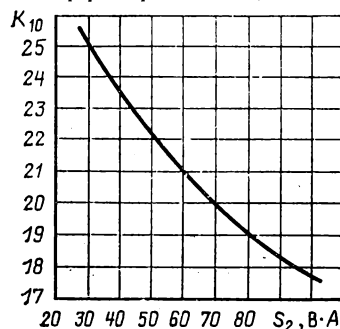


Рис. 28.57. Кривые предельной кратности для трансформатора тока ТФЗМ-35Б

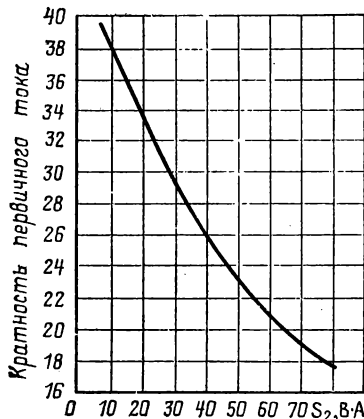


Рис. 28.58. Кривые предельной кратности для трансформаторов тока ТФЗМ110Б

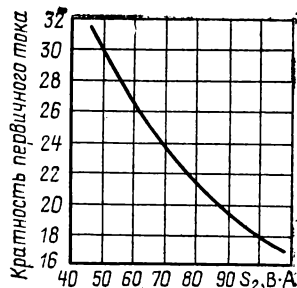


Рис. 28.59. Кривые предельной кратности для трансформаторов тока ТФЗМ150Б

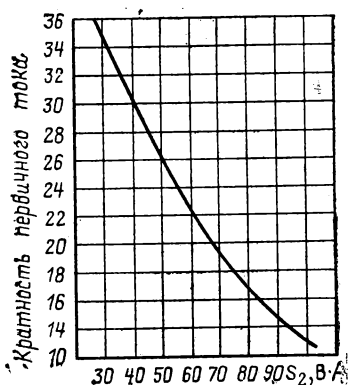


Рис. 28.60. Кривые предельной кратности для трансформаторов тока ТФЗМ220Б

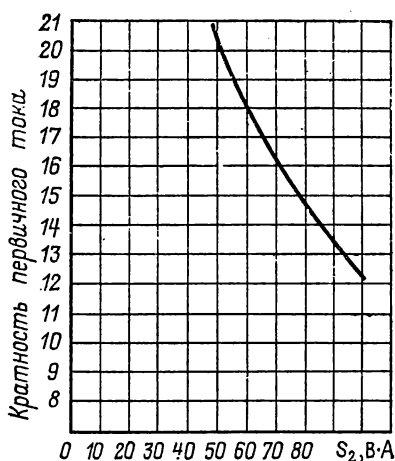


Рис. 28.61. Кривые предельной кратности для трансформаторов тока ТФУМ330А

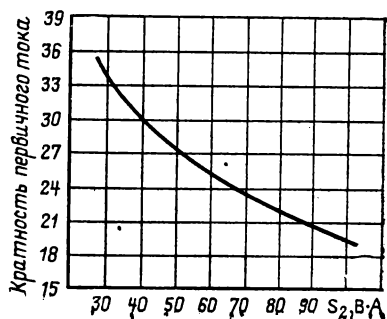


Рис. 28.62. Кривые предельной кратности для трансформаторов тока ТФЗМ500Б

На рис. 28.50—28.64 приведены кривые предельной кратности $K_{10}=I_2/I_1$ для основных типов ТТ.

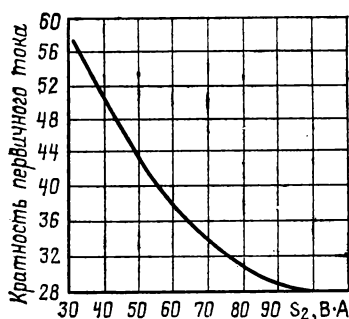


Рис. 28.63. Кривые предельной кратности для трансформаторов тока ТФРМ500Б

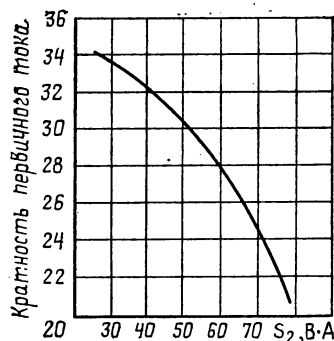


Рис. 28.64. Кривые предельной кратности для трансформаторов тока ТФРМ750А

28.10. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ (ТН)

Основные обозначения

- $U_{1ном}$, $U_{2ном}$ — номинальные первичное и вторичное напряжения, В;
 ΔU % — погрешность по напряжению;
 ΔU_H % — погрешность по напряжению, обусловленная током нагрузки;
 ΔU_X % — погрешность по напряжению, обусловленная током холостого хода;
 δ' — угловая погрешность, мин;
 δ'_x — угловая погрешность, обусловленная током холостого хода;
 U_1 — первичное напряжение;
 δ_H — угловая погрешность, обусловленная током нагрузки;
 I_0 — намагничивающий ток, А;
 I_1 — первичный ток, А;
 I_2 — вторичный ток, приведенный к первичной обмотке, А;
 U_{a1} % и U_{a2} % — активные падения напряжения от первичного и вторичного приведенного то-

ков на активном сопротивлении первичной и вторичной обмоток в процентах номинального напряжения $U_{1ном}$;

$U_{p1} \%$ и $U_{p2} \%$ — реактивные падения напряжения на первичной и вторичной обмотках от первичного и приведенного вторичного токов в процентах $U_{1ном}$;

i_a — относительная активная составляющая намагничивающего тока;

i_p — относительная реактивная составляющая намагничивающего тока;

r_{1T} и r'_{2T} — активные сопротивления первичной и вторичной обмоток, Ом;

x_{1T} и x'_{2T} — реактивные сопротивления обмоток трансформатора в Т-образной схеме замещения, Ом;

$p_{ст}$ — удельные потери в стержне, Вт/кг, при индукции в стержне $B_{ст}$;

$G_{ст}$ — масса стержня;

$p_{яр}$ — удельные потери в ядрах, Вт/кг, при индукции $B_{т.яр}$;

$q_{ст}$, $q_{яр}$ — удельные мощности намагничивания в стержне и ядре, Вт/кг, при индукции $B_{ст}$ и $B_{т.яр}$;

$n_{ст}$, $n_{яр}$ — числа стыков в стержне и ядре;

$q_{з,ст}$, $q_{з,яр}$ — удельные мощности намагничивания, В·А/см², в зазоре при индукциях $B_{ст}$ и $B_{т.яр}$;

$S_{ст}$ и $S_{яр}$ — площади зазоров стыка и ядра, см²;

I_2 — ток нагрузки, А;

U_2 — вторичное напряжение, В;

φ_2 — угол сдвига между $\underline{U}_2$ и $\underline{I}_2$;

φ_K — угол сдвига фаз, определяемый активным и реактивным сопротивлениями обмоток;

ψ — угол потерь;

ρ_{20} — удельное сопротивление материала обмоток при 20 °C, Ом·м;

D_1 , D_2 — средние диаметры первичной и вторичной обмоток, м;

q_1 , q_2 — сечения проводников первичной и вторичной обмоток, м²;

w_1 , w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток;

x_K — сопротивление короткого замыкания, Ом;

Δw — витковая коррекция;

d_c — средний диаметр кольцевого промежутка между первичной и вторичной обмотками, м;

h — высота обмотки, м;

a — ширина канала рассеяния (рассеяние от внешнего слоя вторичной обмотки до внутреннего слоя первичной), м;

b_1 — радиальная толщина первичной обмотки, м;

b_2 — радиальная толщина вторичной обмотки, м.

Общие сведения

Векторная диаграмма трансформатора напряжения (ТН) приведена на рис. 28.65, а. Условные положительные направления токов и напряжений даны на рис. 28.65, б.

Погрешность по напряжению

$$\Delta U \% = - \frac{AF}{OF} 100 =$$

$$= - \left\{ \frac{I_0 (r_{1T} \sin \psi + x_{1T} \cos \psi)}{U_1} + \right.$$

$$\left. + \frac{I'_2 [(r_{1T} + r'_{2T}) \cos \varphi_2 + (x_{1T} + x'_{2T}) \sin \varphi_2]}{U_1} \right\} \times$$

$$\times 100 = \Delta U_x \% + \Delta U_H \%;$$

$$\Delta U_x \% = - (U_{a1} \% i_a + U_{p1} \% i_p);$$

$$i_a = \frac{I_0 w_1}{I_1 w_1} \sin \psi; \quad i_p = \frac{I_0 w_1 \cos \psi}{I_1 w_1};$$

$$U_{a1} \% = \frac{I_1 r_{1T}}{U_{1ном}} 100 \%;$$

$$U_{p1} \% = \frac{I_1 x_{1T}}{U_{1ном}} 100 \%;$$

$$\Delta U_H \% = - (U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \sin \varphi_2);$$

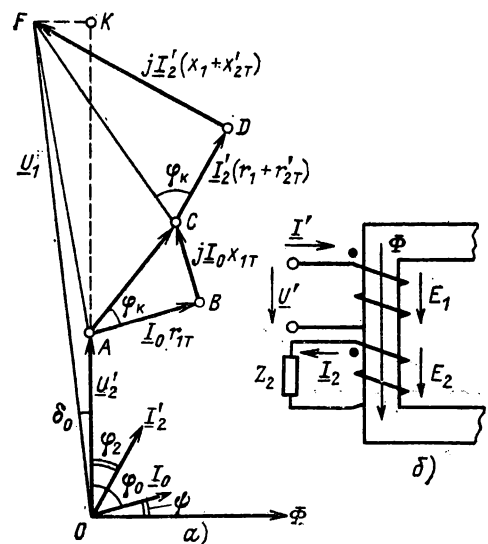


Рис. 28.65. Векторная диаграмма трансформатора напряжения и условные положительные направления электрических величин

$$U_a \% = U_{a1} \% + U_{a2} \% =$$

$$= \frac{I_1 r_{1T} + I_2' r_{2T}}{U_{1ном}} 100\%;$$

$$U_p \% = U_{p1} \% + U_{p2} \% =$$

$$= \frac{I_1 x_{1T} + I_2' x_{2T}}{U_{1ном}} 100\%.$$

Если первичное напряжение U_1 и ток нагрузки I_2 отличаются от номинальных, то

$$\Delta U_x \% = -\frac{1}{\alpha} (U_{a1} \% i_a + U_{p1} \% i_p);$$

$$\Delta U_H \% = -\frac{\beta}{\alpha} (U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \sin \varphi_2),$$

где $\alpha = U_1/U_{1ном}$; $\beta = I_2/I_{2ном}$.

Угловая погрешность в минутах

$$\delta' = \frac{3440}{U_1} \{ I_0 (r_{1T} \cos \psi - x_{1T} \sin \psi) +$$

$$+ I_2' [(r_1 + r_{2T}') \sin \varphi_2 - (x_1 + x_{2T}') \cos \varphi_2] \} = \delta'_x + \delta'_H;$$

$$\delta'_x = \frac{3440}{100} (U_{a1} \% i_p - U_{p1} \% i_a);$$

$$\delta'_H = \frac{3440}{100} (U_a \% \sin \varphi_2 - U_p \% \cos \varphi_2).$$

В общем случае при ненормальном режиме

$$\delta'_x = 34,4 (U_{a1} \% i_p - U_{p1} \% i_a / \alpha);$$

$$\delta'_H = 34,4 \beta / \alpha (U_a \% \sin \varphi_2 - U_p \% \cos \varphi_2).$$

Трансформаторы напряжения должны удовлетворять ГОСТ 1983-77. Классы точности и нормированные погрешности приведены в табл. 28.10. Указанные погрешности должны соблюдаться при колебании первичного напряжения в пределах $(0,8-1,2) U_{1ном}$, коэффициенте мощности активно-индуктивной нагрузки, равном 0,8, и изменении отдаваемой мощности в пределах от $0,25 S_{ном} (U_1/U_{1ном})^2$ до $S_{ном} (U_1/U_{1ном})^2$, где $S_{ном}$ — номинальное значение мощности, В·А; $U_{1ном}$ — номинальное значение первичного напряжения; U_1 — значение напряжения, подведенного к ТН.

При использовании в трехфазной системе двух ТН (рис. 28.66) не рекомендуется присоединять нагрузку между точками a и c , так как через трансформаторы будет протекать дополнительный ток нагрузки, вызывающий повышение погрешности. Если ТН имеет дополнительные обмотки, соединенные в открытый треугольник, то можно включать дополнитель-

Таблица 28.10. Погрешности трансформаторов напряжения

Класс точности	Максимальная погрешность ($\pm$)	
	напряжения, %	угловая, мин
0,5	0,5	20
1	1	40
3	3	Не нормирована

Примечание. Для трехобмоточных трансформаторов классы точности устанавливаются для основной вторичной обмотки.

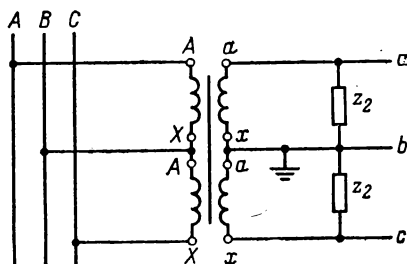


Рис. 28.66. Присоединение нагрузки при двух ТН в трехфазной сети

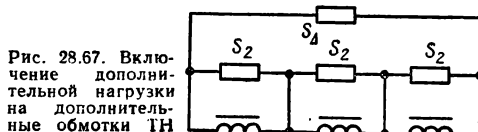


Рис. 28.67. Включение дополнительной нагрузки на дополнительные обмотки ТН

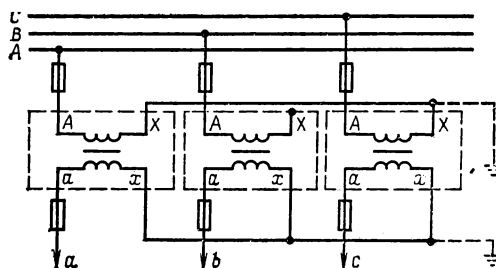


Рис. 28.68. Схема включения трех однофазных ТН с заземленной нейтралью

ную нагрузку S_{Δ} (рис. 28.67). Сумма мощности фазной нагрузки S_2 и общей нагрузки S_{Δ} не должна превышать мощности, которую может отдавать ТН в классе точности 3, т. е. $S_2 + S_{\Delta} \leq S_{класс3}$.

На рис. 28.68 приведена схема включения трех однофазных ТН по схеме звезда — звезда с заземленной нейтралью. Схема включения трехфазного трехстержневого трансформатора с заземлением нейтрали показана на рис. 28.69. Трехфазный трансформатор напряжения для контроля изоляции сети с заземленной нейтралью имеет три обмотки $a_d x_d$, соединенные в открытый треугольник. Схема включения ТН для измерения мощности дана на рис. 28.70. Для контроля изоляции используется схема рис. 28.71. При заземлении фазы А первичная обмотка ОА закорачивается — рис. 28.72, а. Первичные обмотки ОВ и ОС попадают под линейное напряжение (оно возрастает в $\sqrt{3}$ раз). Потоки этих обмоток пронизывают обмотку ОА, и она может быть повреждена, так как длительность замыкания фазы А на землю достаточно велика. Для того, чтобы избежать такого режима, магнитопровод имеет пять стержней рис. 28.72, г. Через боковые стержни замыкаются потоки от первичных обмоток ОВ и ОС. При отсутствии за-

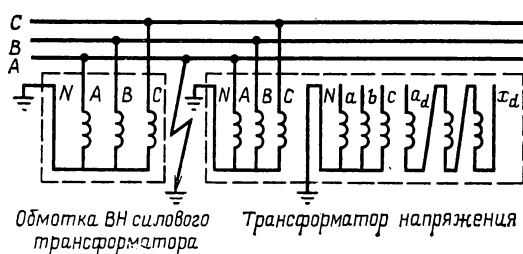


Рис. 28.69. Схема включения трехфазного трехстержневого ТН в системе с заземленной нейтральной точкой

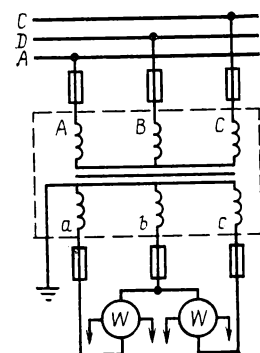


Рис. 28.70. Схема включения трехфазного трехстержневого ТН для измерения мощности по методу двух ваттметров

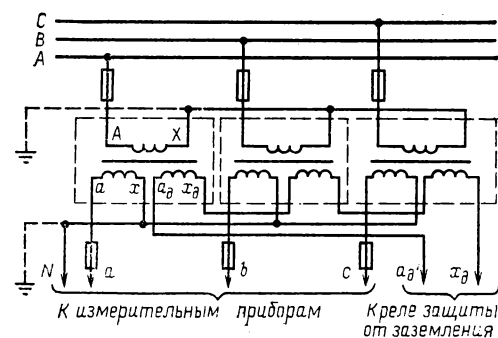


Рис. 28.71. Схема включения трех однофазных ТН для контроля изоляции

земления на зажимах a_d и x_d напряжение равно нулю. При заземлении любой фазы на обмотке a_d и x_d появляется напряжение, которое используется для сигнализации и работы системы автоматики. Векторные диаграммы первичных и вторичных напряжений для нормального режима и при заземлении фазы А показаны на рис. 28.72, б и в.

Выбор основных параметров ТН нормального исполнения

Заданы $U_{1ном}$, $U_{2ном}$, $S_{2ном}$; класс точности; число фаз; род установки; погрешность и остальные данные должны соответствовать ГОСТ 1983-77.

1. Сечение магнитопровода, m^2 ,

$$S_c = \frac{E_{1ном}/\omega_1}{4,44fB_m},$$

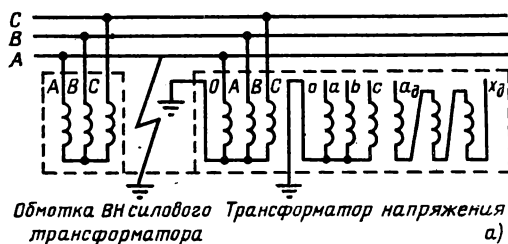


Рис. 28.72. Схема включения трехфазного ТН для контроля изоляции в системе с изолированной нейтралью: а — схема включения; б — векторные диаграммы напряжений в нормальном режиме; в — векторные диаграммы напряжений при заземлении фазы А; г — ТН с пятистержневым магнитопроводом

Рис. 28.72. Схема включения трехфазного ТН для контроля изоляции в системе с изолированной нейтралью:

а — схема включения; б — векторные диаграммы напряжений в нормальном режиме; в — векторные диаграммы напряжений при заземлении фазы А; г — ТН с пятистержневым магнитопроводом

где $E_{1ном} = U_{1ном}$; $U_{1ном}/\omega_1 = 1 \div 2$ В/виток; $B_m = 1 \div 1,1$ Тл. Меньшие значения относятся к трансформаторам напряжения с $U_{1ном} < 35$ кВ. Материал магнитопровода обычно сталь 1512, 3414.

2. Сечение и числа витков обмоток. Сечение первичной обмотки $q_1 = I_{1ном}/J$, но не менее $0,0177$ mm^2 (диаметр $0,15$ мм); здесь

$$I_{1ном} \approx P_{2ном}/U_{1ном};$$

$J = 0,3 \div 0,5$ А/ mm^2 , марка провода обычно ПЭЛ. Вторичная обмотка

$$q_2 = I_{2ном}/J; \quad I_{2ном} = S_{2ном}/U_{2ном};$$

$$\omega_1 = U_{1ном}/4,44fB_m S_c;$$

$$\omega_2 = U_{2ном}/4,44fB_m S_c.$$

Затем определяем пространство, занимаемое обмотками с учетом межслоевой изоляции и изоляции между первичной и вторичной обмотками.

3. Размеры магнитопровода

$$S_{яp} = 1,05 S_c.$$

Расстояние между торцом катушки и ярмом, между наружной поверхностью первичной обмотки и другим стержнем выбирают в соответствии с испытательным напряжением по ГОСТ 1516.1-76 (табл. 28.11).

Вторичная обмотка располагается на стержне магнитопровода.

Таблица 28.11. Нормированные испытательные напряжения электромагнитных ТН с нормальной изоляцией, кВ

Класс напряжения, кВ	Напряжение грозовых импульсов								Напряжение коммутационного импульса для испытания внешней (в сухом состоянии и под дождем*) и внутренней изоляции относительно земли	Кратковременные напряжения промышленной частоты				
	для испытания внутренней изоляции				для испытания внешней изоляции					одноминутное для испытания внутренней изоляции		при плавном подъеме для испытания внешней изоляции относительно земли		
	линейного вывода относительно земли		вывода нейтрали		линейного вывода относительно земли		вывода нейтрали ²			относительно земли	между фазами ³	в сухом состоянии	под дождем ⁴	
	полный импульс	срезанный импульс	трех-, соединенных вместе, линейных выводов, полный импульс	полный импульс	срезанный импульс	полный импульс	срезанный импульс	полный импульс						срезанный импульс
3	44	50	42	42	50	42	50	42	50	—	24	24	26	20
6	60	70	57	57	70	57	70	57	70	—	32	32	34	26
10	80	90	75	75	90	75	90	75	90	—	42	42	45	34
15	108	120	100	100	120	100	120	100	120	—	55	55	60	45
20	130	150	105	120	150	120	150	120	150	—	65	65	70	55
24	150	175	—	140	170	140	175	140	175	—	75	57	80	65
27	170	200	—	160	195	160	200	160	200	—	80	80	90	70
35	200	230	140	185	225	185	230	185	230	—	95	95	105	85
110	480	550	—	—	—	460	570	—	—	—	200	—	280	215
150	660	760	—	—	—	630	785	—	—	—	275	—	355	290
220	950	1090	—	—	—	900	1130	—	—	—	400	—	520	425
330	1200	1300	—	—	—	1150	1350	—	—	950	460	—	670	550
500	1675	1800	—	—	—	1600	1950	—	—	1300	630	—	900	740
750	2300	2500	—	—	—	2100	2600	—	—	—	950	—	1050	900

* Для соединенных в звезду обмоток с полной изоляцией нейтрали при невыведенной нейтрали.

² Для соединенных в звезду обмоток с полной изоляцией нейтрали при выведенной нейтрали.

³ Для трехфазных трансформаторов напряжения классов напряжения 3—35 кВ с неполной изоляцией нейтрали.

⁴ Для трансформаторов напряжения категории размещения 1.

4. Активные и реактивные сопротивления обмоток

$$r_1 = \rho_{20} \frac{\pi D_1 w_1}{q_1};$$

$$r_2^s = \rho_{20} \frac{\pi D_2 w_2}{q_2} \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2.$$

Реактивное сопротивление трансформатора x_k , приведенное к первичной обмотке:

$$x_k = \frac{w_1^2 d_c C k}{805 h},$$

где k — коэффициент Роговского:

$$k = 1 - \frac{a + b_1 + b_2}{\pi h};$$

$$x_{1T} = x_k/2; \quad x_{2T}^s = x_k/2; \quad C = a + \frac{b_1 + b_2}{3}.$$

5. Составляющие тока холостого хода в относительных единицах. Расчет i_a и i_p ведем по методике [28.10]:

$$i_a = \frac{\rho_{ст} G_{ст} + \rho_{яр} G_{яр}}{U_{1ном} I_{1ном}};$$

$$i_p = \frac{q_{ст} G_{ст} + q_{яр} G_{яр} + n_{ст} q_{3,ст} S_{ст} + n_{яр} q_{3,яр} S_{яр}}{U_{1ном} I_{1ном}}.$$

Значения $q_{ст}$, $q_{яр}$, $q_{3,ст}$, $q_{3,яр}$ приведены в [28.10].

6. Если трансформатор не укладывается в требуемый класс точности, то вводится вилковая коррекция Δw % с таким расчетом, чтобы ΔU % = 0 при $S_2 = 0,25 S_{2ном}$, $U_1 = 1, 2 U_{1ном}$.

$$\Delta U \% = \Delta U_x \% + \Delta U_H \% + \Delta w \%.$$

$$\Delta w \% = \frac{w_{ном} - w_f}{w_{1ном}} 100.$$

Рекомендуемый ход кривых погрешности от вторичной мощности для класса 0,2 дан на рис. 28.73. Верхняя кривая для $U_1 = 0,8 U_{1ном}$, нижняя для $U_1 = 1,2 U_{1ном}$. Кривые позволяют определить мощность, допустимую в более

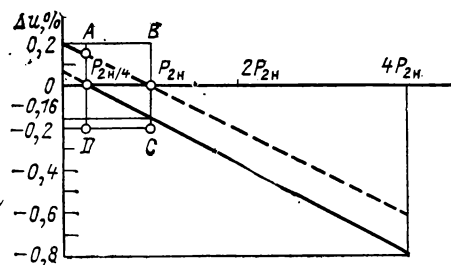


Рис. 28.73. Рекомендуемая зависимость погрешности для класса 0,2; $\cos \varphi = 0,8$. Прямоугольник ABCD — область допустимой погрешности

низком классе точности. Трансформатор напряжения вне класса точности может быть нагружен с кратностью до 8—10 $S_{2ном}$ [28.5]. Эта мощность определяется нагревом обмоток ТН.

Компенсация угловой погрешности может быть получена схемным методом.

При индуктивной нагрузке угловая погрешность всегда положительна (U_2 опережает U_1).

Для уменьшения погрешности вводится искусственная отрицательная угловая погрешность. Схема такого трансформатора дана на рис. 28.74. Первичная обмотка каждого стержня состоит из основной части АХ и компенса-

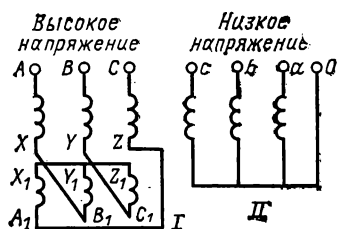


Рис. 28.74. Схема трансформатора напряжения НТМК

рующей A_1X_1 . Результирующая ЭДС E_A складывается из E_{A1} , наведенной в части АХ, и $-E_{B1}$, наведенной в части B_1Y_1 . При этом ЭДС E_A будет опережать вторичную ЭДС E_2 .

При активной нагрузке эта схема компенсации дает увеличение погрешности.

28.11. КАСКАДНЫЕ, КОНДЕНСАТОРНЫЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ТН

Принцип действия каскадного ТН

Принципиальная схема двухкаскадного ТН представлена на рис. 28.75. На двух магнитопроводах 1 и 2 расположены первичные обмотки 3 и 4. Вторичная обмотка 7 включена на нагрузку Z_2 . Кроме того, имеются две обмотки связи 5 и 6, находящиеся на магнитопроводах 1 и 2.

Рассмотрим сначала режим, когда K_1 и K_2 разомкнуты. Так как магнитопроводы 1 и 2 и

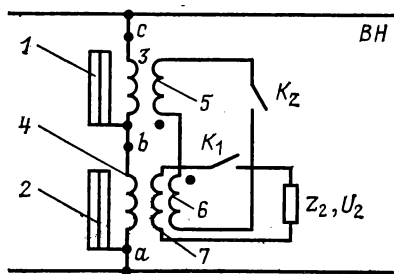


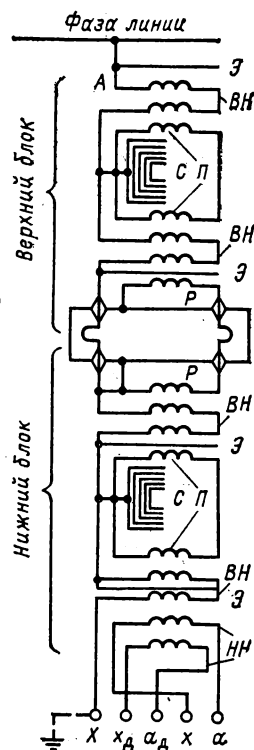
Рис. 28.75. Принципиальная схема каскадного ТН

обмотки 3 и 4 идентичны, то напряжение между обмотками 3 и 4 делится пополам. При включении нагрузки Z_2 (замыкается K_1) входное сопротивление нижнего каскада между точками а и б падает и напряжение на нагрузке Z_2 уменьшается. Для выравнивания напряжения служат обмотки связи 5 и 6, включенные встречно через ключ K_2 . При неравенстве первичных напряжений U_{ab} и U_{bc} по обмоткам 5 и 6 при замкнутом K_2 течет уравнивающий ток, который нагружает верхний каскад. При этом напряжение U_{ab} возрастает, а напряжение U_{bc} уменьшается. Таким образом, равномерно нагружаются оба каскада.

Каждый каскад выполняется на половинное напряжение, что дает возможность уменьшить стоимость и габариты ТН примерно в 2 раза.

Схема реального каскадного ТН на напряжение $220/\sqrt{3}$ кВ представлена на рис. 28.76. На магнитопровод С верхнего блока наматы-

Рис. 28.76. Принципиальная схема соединения обмоток каскадного трансформатора напряжения типа НКФ-220-58: ВН — первичная обмотка; НН — вторичная обмотка; П — выравнивающие обмотки; С — магнитопровод; А, Х — выводы первичной обмотки; а, х — выводы вторичной обмотки; а_д и х_д — выводы дополнительной вторичной обмотки



ваются две выравнивающие обмотки П, включенные встречно. На них наматываются обмотки высокого напряжения ВН. Сверху обмоток ВН расположены экраны Э для выравнивания распределения потенциалов на внешних слоях обмоток ВН. Сверху обмотки ВН нижнего стержня верхнего блока наматывается обмотка связи Р. Такая же обмотка наматывается на верхнем стержне магнитопровода нижнего блока. На нижнем стержне нижнего блока расположены две нагрузочные обмотки ах и а_дх_д. Верхний и нижний блоки оформлены в виде отдельных узлов, связанных между собой соединительной коробкой.

При расчете блок разбивается на два элемента, каждый из которых рассчитывается на напряжение 32 кВ. Выбор размеров магнитопроводов и расчет параметров обмоток элемента производится аналогично ТН нормального исполнения. Из-за значительных результирующих активных и реактивных сопротивлений погрешность каскадного ТН выше, чем нормального исполнения. В связи с этим для получения высокого класса точности необходимо снижать нагрузку.

Конденсаторный ТН

Трансформаторы типа НКФ при напряжениях более 110 кВ имеют небольшую точность из-за большого активного и реактивного сопротивлений обмоток. Для повышения точности необходимо уменьшать нагрузку.

Большой трудностью является также равномерное распределение напряжения между элементами НКФ при переходных процессах. Поэтому при первичных напряжениях более 110 кВ целесообразно применение конденсаторных трансформаторов напряжения (рис. 28.77).

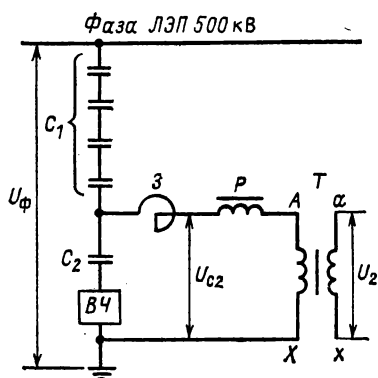


Рис. 28.77. Принципиальная схема конденсаторного трансформатора напряжения

Емкость конденсатора $C_1 \ll C_2$, в результате $U_{C2} \ll U_{C1}$. Напряжение нижней ступени U_{C2} обычно составляет 10 кВ. Поэтому напряжение на нагрузку U_2 подается через трансформатор AX/ax . Вторичное напряжение $U_2 = 100$ В.

Для того чтобы выходное напряжение U_2 не зависело от нагрузки, реактор P настроен в резонанс с емкостью $C_1 + C_2$:

$$\omega L_P = \frac{1}{\omega (C_1 + C_2)}.$$

Можно показать, что

$$\frac{U'_2}{U_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2},$$

где U'_2 — напряжение на выводах AX .

При надлежащем выборе элементов конденсаторный трансформатор напряжения может быть выполнен на высокий класс точности (0,2).

Т а б л и ц а 28.12. Испытательные напряжения для конденсаторных ТН напряжением 1150 кВ по рекомендациям ВЭИ, кВ

Действующее значение напряжения промышленной частоты		Грозовой импульс		Коммутационный импульс
в течение 1 мин	плавный подъем	полный	срезанный	
1150	1300	2900	3200	2100

Из-за нелинейности элементов схемы при внезапном отключении нагрузки возникают феррорезонансные колебания на частоте, равной $1/3$ основной. Эти колебания искажают кривую выходного напряжения и могут приводить к ложным срабатываниям защиты. Для подавления этих колебаний параллельно основной обмотке включается резистор либо специальный балластный фильтр [28.5]. С целью уменьшения погрешности в установившемся и переходном режимах работы может быть применен полупроводниковый корректор [28.14]. Конденсаторный делитель C_1, C_2 используется также для питания высокочастотной защиты ВЧ.

Заградительный дроссель Z препятствует токам высокой частоты проходить в реактор P и трансформатор напряжения. Испытательные напряжения для конденсаторных ТН приведены в табл. 28.12.

Указанный принцип может использоваться также для отбора небольшой мощности для промышленных целей от линии передачи высокого и сверхвысокого напряжения (емкостный отбор).

Оптико-электронные ТН

Для измерения высоких и сверхвысоких напряжений, а также для исследования электрических аппаратов на эти напряжения традиционные электромагнитные трансформаторы становятся малоприменимыми вследствие больших массы, габаритов и погрешностей, возникающих из-за применения каскадных схем с большим числом элементов.

В оптико-электронных трансформаторах напряжения (ОЭТН) применяется внешняя амплитудная модуляция светового сигнала (рис. 28.78). В качестве преобразователей применяются ячейка Керра (рис. 28.78, а) или ячейка Поккельса (рис. 28.78, б). Первая представляет собой прозрачный сосуд, в который налит специальный жидкий диэлектрик (нитробензол). В ячейке размещены два электрода, между которыми возникает однородное электрическое поле, создаваемое измеряемым напряжением. Это поле перпендикулярно направлению прохождения светового потока. Световой поток от источника 1 проходит через оптическую систему 2 и поляризатор 3 и подается в ячейку Керра 4 . Затем луч проходит через анализатор 5 и подается на фотоприемник. Плоскости поляризации поляризатора и анализатора сдвинуты на 90° . В результате при отсутствии напряжения U фотосигнал на выходе 5 равен нулю.

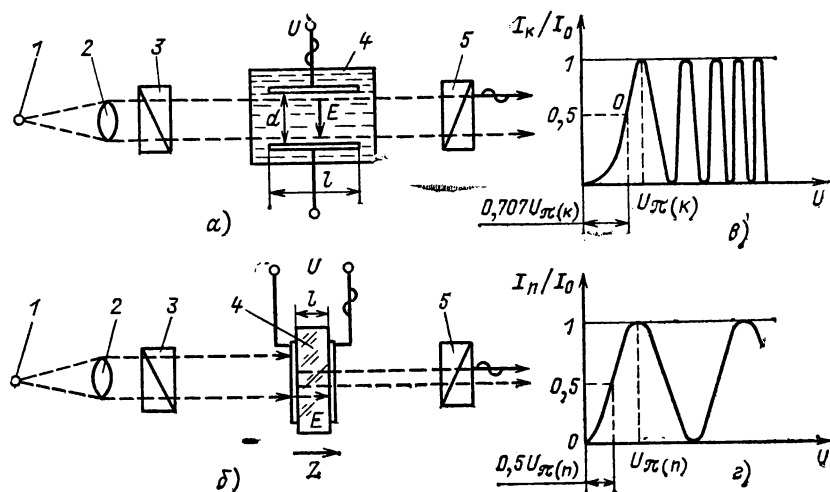


Рис. 28.78. Преобразователи напряжения в интенсивность светового сигнала и их статические характеристики:

a — ячейка Керра; *б* — ячейка Погкельса; *в* и *г* — статические характеристики

При подаче напряжения U фотосигнал на выходе в относительных единицах определяется уравнением

$$I_K = \frac{I_H}{I_0} = \sin^2 \left(\pi B_K l \frac{U^2}{d^2} \right),$$

где B_K — постоянная Керра; l — длина пути, проходящего светом в электрооптической среде; d — расстояние между электродами; I_0 — интенсивность света, поступающего в электрооптическую ячейку.

Для ячейки Керра характерна квадратичная зависимость выходного фотосигнала от напряжения. Эта зависимость представлена на рис. 28.78, *в*.

Для работы на приблизительно линейном участке этой зависимости необходима подача смещающего напряжения $0,707 U_{\pi(K)}$. Ввиду того, что подача такого напряжения связана со значительными трудностями, выход на линейный участок осуществляется оптическим путем. Между поляризатором и ячейкой вводится пластинка слюды, создающей эффект, аналогичный смещаемому напряжению. Таким образом, при отсутствии напряжения система находится в точке 0 на кривой рис. 28.78, *г*.

В ячейке Погкельса (рис. 28.78, *б*) между электродами размещается кристалл дигидрофосфата аммония. В отличие от ячейки Керра направление электрического поля совпадает с направлением светового луча. Относительный фотосигнал на выходе поляризатора 5 равен:

$$I_P = \frac{I_H}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi r_{63} n_0^3}{\lambda} U \right),$$

где r_{63} — электрооптический коэффициент кристалла; n_0 — обыкновенный показатель преломления света; λ — длина волны монохроматического света.

Как видно из рис. 28.78, *г*, выходная характеристика ячейки Погкельса в начальной части кривой более линейна, чем ячейки Керра. Так же, как и в ячейке Керра, для выхода

на линейную часть необходимо смещение, равное $0,5 U_{\pi(P)}$.

28.12. ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ, ВЫПУСКАЕМЫЕ В СССР

Трансформаторы напряжения применяются в электрических цепях переменного тока с номинальными напряжениями от 0,38 до 1150 кВ для питания электрических измерительных приборов и защитных устройств.

Трансформаторы классов напряжений до 35 кВ включительно и типа НКФ-110-58 предназначены для сетей с изолированной нейтралью, трансформаторы классов напряжения 110 кВ и выше — для сетей с заземленной нейтралью. Трансформаторы напряжения соответствуют требованиям ГОСТ 1983-77.

Типовое обозначение ТН расшифровывается следующим образом:

НОМ — однофазный, с естественным масляным охлаждением;

НТМИ — трехфазный, с естественным масляным охлаждением, с обмоткой для контроля изоляции сети;

ЗНОМ — однофазный, с естественным масляным охлаждением с заземленным выводом первичной обмотки;

НКФ — каскадный, в фарфоровой крышке;

НДЕ — с емкостным делителем напряжения (конденсаторный ТН).

Буква Л в типовом обозначении трансформатора напряжения означает исполнение с литой изоляцией, Г — с газовой изоляцией.

Класс точности ТН характеризуется максимально допустимыми погрешностью напряжения и угловой погрешностью при определенном режиме работы ТН.

Значения погрешностей для различных классов точности (согласно ГОСТ 1983-77) приведены в табл. 28.10.

Трансформаторы напряжения сохраняют класс точности при изменении первичного напряжения от 80 до 120 % номинального.

ТН с литой изоляцией (сухие)

Трансформаторы напряжения серий НОЛ и ЗНОЛ представляют собой литой блок, в котором в эпоксидном компаунде залиты обмотки и магнитопровод. Магнитопровод стержневого типа, шихтованный, разрезной, С-образный или Ш-образный, намотан из электротехнической холоднокатаной стали. Обмотки расположены на магнитопроводе концентрически. Внутренней обмоткой является дополнительная вторичная обмотка (для ТН серии ЗНОЛ), на ней расположена основная вторичная обмотка, поверх которой намотана первичная обмотка. Первичная обмотка экранирована алюминиевой фольгой, соединенной с вводом высокого напряжения первичной обмотки. Экран служит для повышения импульсной электрической прочности трансформатора.

В литом блоке вместе с магнитопроводом и обмотками залиты втулки, к которым крепится основание, соединенное с магнитопроводом. На основании расположены узел заземления ТН и табличка технических данных. Выводы вторичной или вторичных обмоток и заземляемый вывод первичной обмотки закрыты крышкой.

Трансформаторы, предназначенные для встраивания в токопроводы турбогенераторов, снабжены ножевым вторичным контактом.

Масляные ТН

Шихтованные магнитопроводы, собраны из пластин электротехнической стали. Обмотки слоевые, намотаны круглым или прямоугольным обмоточным проводом на каркасах из электроизоляционного картона. Обмотка высокого напряжения состоит из двух или больше катушек, соединенных последовательно и, имеет электростатические экраны для защиты от перенапряжений. На крышке трансформатора напряжения типов НОМ и НТМИ смонтированы вводы высокого и низкого напряжения, установлена пробка для доливки трансформаторного масла.

Масляные каскадные ТН в зависимости от номинального напряжения изготавливаются для напряжения 110 кВ одноблочными, а на 220, 330 и 400, 500 кВ — соответственно двух, трех и четырехблочными.

Каждый блок состоит из стержневого магнитопровода с двумя стержнями. Обмотка высокого напряжения равномерно распределена по всем стержням магнитопровода. Обе вторичные обмотки низкого напряжения, основная и дополнительная, расположены на нижнем стержне нижнего магнитопровода, имеющего наименьший потенциал относительно земли (один конец первичной обмотки заземляется). На остальных стержнях размещены также промежуточные (выравнивающая и связующая) обмотки, необходимые для создания равномерного распределения нагрузки вторичных обмоток по всем стержням.

Обмотки наматываются в следующем порядке: вначале выравнивающая обмотка, затем первичная (ВН), на которую устанавливается электростатический экран. Поверх экрана на нижнем стержне нижнего блока размещены обе вторичные обмотки. На остальных стержнях (корме верхнего) у трансформаторов на

220 кВ и выше намотаны связующие обмотки.

Активная часть помещена в фарфоровую крышку, заполненную трансформаторным маслом. Сверху крышки установлен маслорасширитель, обеспечивающий компенсацию температурных изменений масла над обмотками. Для наблюдения за уровнем масла трансформатора на стенке маслорасширителя установлен маслоуказатель. Маслорасширитель закрыт крышкой, на которой закреплен воздухоосушитель, предназначенный для очистки от влаги и механических примесей воздуха, поступающего в трансформатор.

Линейный отвод обмотки ВН подсоединен к выводу, закрепленному на крышке, а заземляемый конец Х и концы вторичных обмоток подведены к панели зажимов, расположенной в коробке внутри нижнего основания. Электрическое соединение блоков между собой осуществляется перемычками, соединяющими вводы на крышке маслорасширителя нижнего блока и на дне верхнего блока.

Трансформаторы на напряжение 330, 400 и 500 кВ имеют емкостные экраны, установленные на верхнем маслорасширителе и служащие для уменьшения напряжения, приходящегося на верхний блок при импульсных перенапряжениях.

Нижние и средние блоки этих трансформаторов закрыты козырьками, служащими для стока дождя.

Конденсаторные трансформаторы напряжения серии НДЕ состоят из емкостного делителя напряжения с экраном, электромагнитного устройства, разъединителя и разрядника. Емкостный делитель напряжения состоит из конденсаторов связи и конденсатора отбора мощности, соединенных последовательно и установленных друг на друга, изолирующей подставки и экрана.

Экран делителя образован алюминиевым корпусом сварной конструкции, наверху которого расположен контактный зажим, и алюминиевым кольцом, выполненным из сварных труб. Электромагнитное устройство, питаемое от емкостного делителя, состоит из реактора, однофазного трехобмоточного понижающего трансформатора и демпфера, размещенных в общем баке с масляным заполнением. Обмотка реактора соединена последовательно с первичной обмоткой понижающего трансформатора, демпфер соединен параллельно с основной вторичной обмоткой понижающего трансформатора.

Реактор служит для компенсации емкостного падения напряжения в делителе и поддержания постоянного значения напряжения в первичной обмотке понижающего трансформатора при изменении нагрузки.

Демпфер состоит из магнитопровода стержневого типа, на каждом стержне которого размещена обмотка из медного провода, и предназначен для демпфирования субгармонических колебаний, возникающих во вторичной цепи при отключении нагрузки или коротких замыканиях.

Бак электромагнитного устройства прямоугольной формы сварен из листовой стали. Понижающий трансформатор имеет шихтованный магнитопровод броневого конструкции,

выполненный из холоднокатаной стали. Магнитопровод реактора — шихтованный, стержневой конструкции, выполненный из холоднокатаной стали с зазорами в стержнях для коррекции индуктивности в процессе изготовления. Первичная и вторичная обмотки понижающего трансформатора и обмотка реактора многослойные, цилиндрические. Поверх первичной обмотки понижающего трансформатора расположен электростатический экран, защищающий обмотку от грозовых перенапряжений. Для получения требуемого класса точности с учетом возможных отклонений значений емкостей конденсаторов связи и отбора мощности от номинального в обмотке реактора и первичной обмотке трансформатора предусмотрены отпайки, подведенные к двум переключателям на семь ступеней напряжения каждый.

Регулировка напряжения и индуктивности производится только на предприятии-изготовителе.

Высокочастотный заградитель представляет собой резонансный контур, предназначенный для ограничения токов высокой частоты в диапазоне 30—500 кГц. Высокочастотный заградитель состоит из катушки индуктивности, разрядника, конденсатора и резистора, размещенных в фарфоровой крышке, установленной на двух опорных изоляторах.

Между делителем и высокочастотным заградителем включается однополюсный разъединитель, между высокочастотным заградителем и электромагнитным устройством включается вентильный разрядник РВС-20, предназначенный для защиты изоляции электромагнитного устройства от атмосферных перенапряжений.

На рис. 28.79 — 28.89 приведены конструкции распространенных трансформаторов напряжения. На рис. 28.90 — схема трансформатора напряжения конденсаторного типа, а

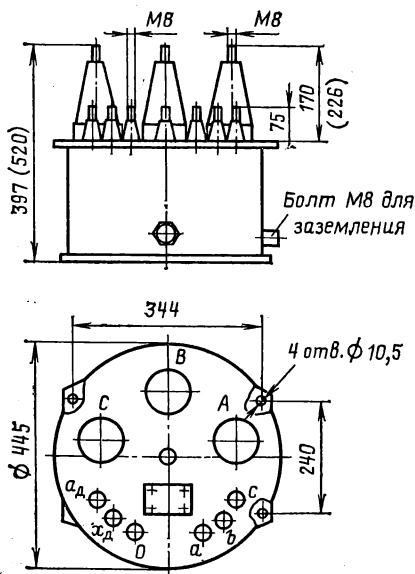


Рис. 28.79. Трансформатор напряжения НТМИ-6-66 (в скобках размеры для трансформатора напряжения НТМИ-10-66)

в табл. 28.13 — характеристики этих трансформаторов.

Требования безопасности применительно к ТН изложены в [28.15].

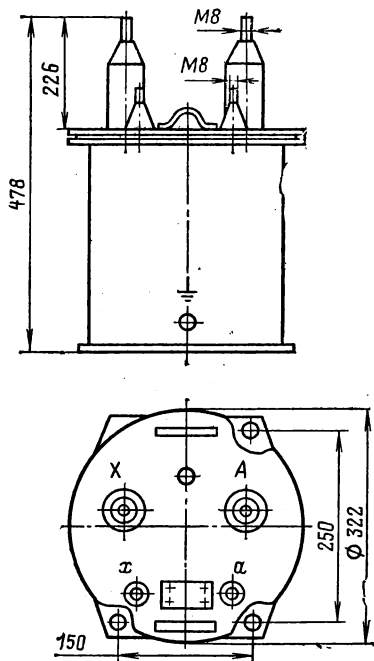


Рис. 28.80. Трансформатор напряжения НОМ-10-66

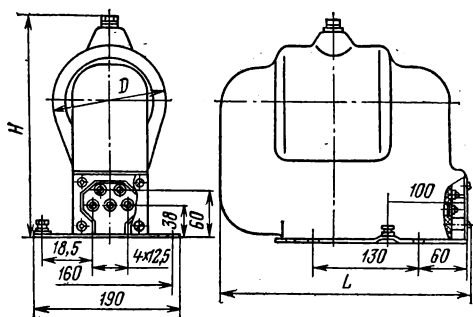


Рис. 28.81. Трансформатор напряжения ЗНОЛ.06

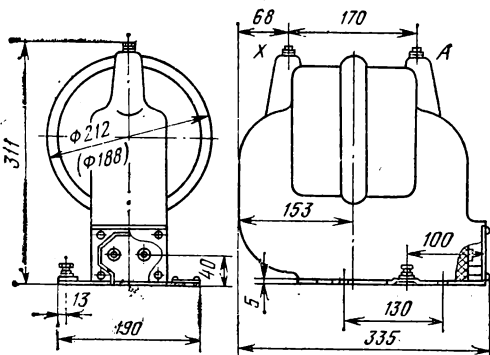


Рис. 28.82. Трансформатор напряжения НОЛ.08-10 (в скобках размер для трансформатора НОЛ.08-6)

Т а б л и ц а 28.13. Технические данные трансформаторов напряжения

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, В		Номинальная мощность в классах точности, В·А			Предельная мощность, В·А	Масса, кг	Цена, руб.
	ВН	НН	0,5	1	3			
НТМИ-6-66	3000 600	100; 100/3*	50 75	75 150	200 300	400 630	59	90
НОЛ.08-6	6000; 6300; 6600	100	50	75	200	400	28	155
НОЛ.11-6	6000	100; 127	—	—	250	500	16	100
ЗНОЛ.09-6	3000/ $\sqrt{3}$; 3300/ $\sqrt{3}$; 6000/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$ 100/3—100*	30	50	150	250	28,5	140
	6300/ $\sqrt{3}$; 6600/ $\sqrt{3}$; 6900/ $\sqrt{3}$		50	75	200	400		
ЗНОЛ.06-6	3000/ $\sqrt{3}$; 3300/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$ 100/3—100*	30	50	150	250	26,5	135
	6000/ $\sqrt{3}$; 6300/ $\sqrt{3}$; 6600/ $\sqrt{3}$; 6900/ $\sqrt{3}$		50	75	200	400		
НТМИ-10-60	10 000	100; 100/3*	120	200	500	1000	81	125
НОМ-10-66	10 000	100					—	53
НОЛ.08-10	6900; 10 000; 11 000	100—110					31,5	165
ЗНОЛ.09-10	10 000/ $\sqrt{3}$;	100/ $\sqrt{3}$;					31,5	150
	11 000/ $\sqrt{3}$	100/3—100*					31,5	150
ЗНОЛ.06-10	10 000/ $\sqrt{3}$;	100/ $\sqrt{3}$;	75	150	300	630	28,5	145
	11 000/ $\sqrt{3}$	100/3—100*					29,5	150
ЗНОЛ.06-15	13 800/ $\sqrt{3}$;	100/ $\sqrt{3}$;	75	150	300	630	28,5	145
	15 750/ $\sqrt{3}$	100/3—100*					29,5	150
ЗНОЛ.06-20	18 000/ $\sqrt{3}$;	100/ $\sqrt{3}$;	75	150	300	630	32,5	180
	20 000/ $\sqrt{3}$	100/3—100*					32,5	180
ЗНОЛ.06-24	24 000/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$;	75	150	300	630	40,5	200
		100/3—100*					40,5	200
ЗНОГ-110-79	110 000/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$; 100*	400	600	1200	2500	250	4000
ЗНОГ-220-79	220 000/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$; 100					390	—
НКФ-110-57	110 000/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$; 100*	400	600	1200	2000	770	850
НКФ-110-58		100/ $\sqrt{3}$; 100/3*						

Продолжение табл. 28.13

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, В		Номинальная мощность в классах точности, В·А			Предельная мощность, В·А	Масса, кг	Цена, руб.
	ВН	НН	0,5	1	3			
НКФ-220-58	150 000/ $\sqrt{3}$;	100/ $\sqrt{3}$; 100*	400	600	1200	2000	1560	1850
	154 000/ $\sqrt{3}$;							
	220 000/ $\sqrt{3}$;							
	220 000/ $\sqrt{3}$							
	230 000/ $\sqrt{3}$							
НКФ-330-73	330 000/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$; 100*	—	500	1000	—	1980	2200
НКФ-400-65	400 000/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$; 100*					4830	4500
НКФ-500-78	500 000/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$; 100*					4830	4200
НДЕ-500-72	500 000/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$; 100*	300	500	1000	1200	3950	5600
НДЕ-750-72	750 000/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$; 100*					4600	8000
НДЕ-1150-78	1 150 000/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$; 100*					15 535	24 200

* Вторичное напряжение на дополнительной обмотке.

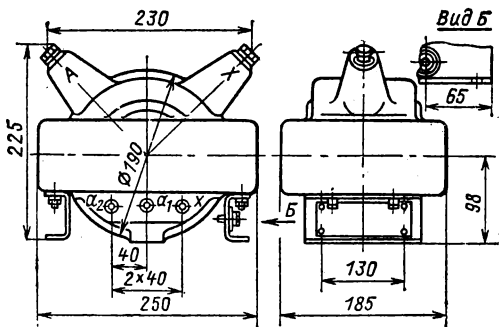


Рис. 28.83. Трансформатор напряжения НОЛ.11-6

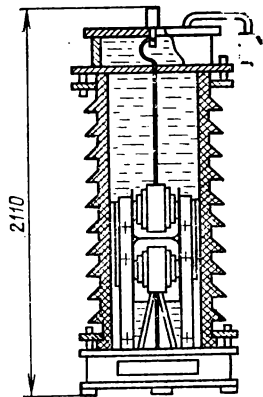


Рис. 28.85. Трансформатор напряжения НКФ-110-58

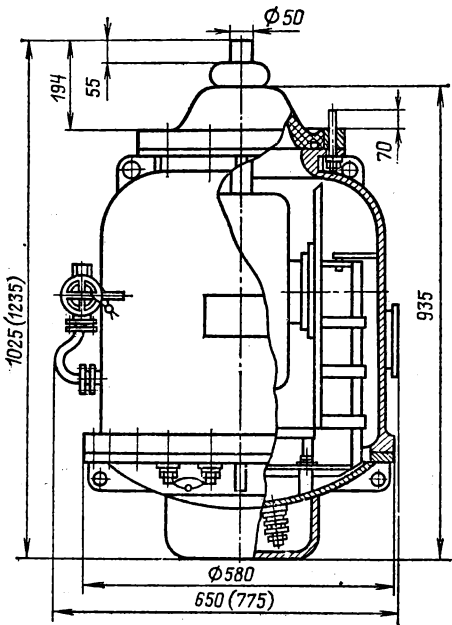


Рис. 28.84. Трансформатор напряжения ЗНОГ-110-79 (в скобках размеры для трансформатора ЗНОГ-220-79)

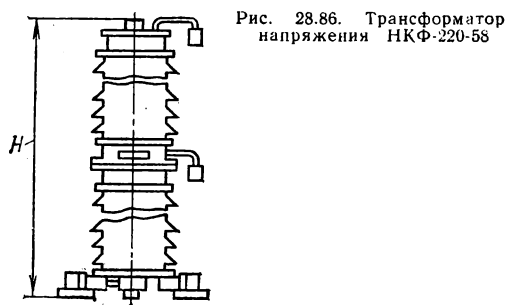


Рис. 28.86. Трансформатор напряжения НКФ-220-58

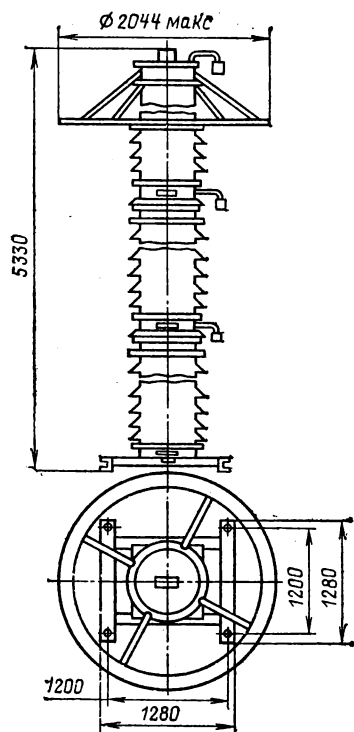


Рис. 28.87. Трансформатор напряжения НКФ-330-73

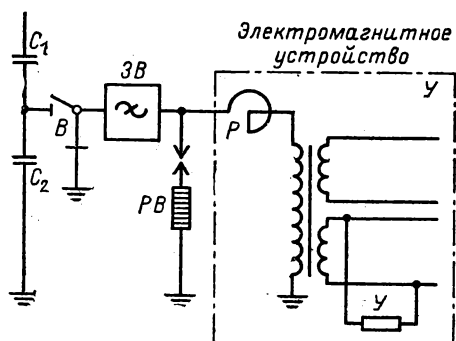


Рис. 28.90. Принципиальная электрическая схема конденсаторного трансформатора напряжения:

C_1 — конденсатор связи; C_2 — конденсатор отбора мощности; B — однополюсный разъединитель; $ЗВ$ — заградитель высокочастотный; $PВ$ — вентильный разрядник; P — реактор; $У$ — устройство для гашения феррорезонансных колебаний (демпфер)

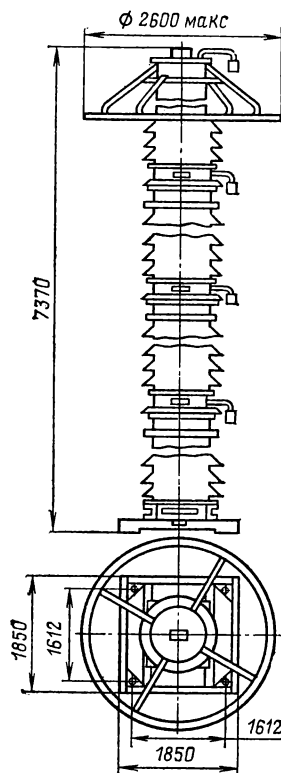


Рис. 28.88. Трансформатор напряжения НКФ-500-78

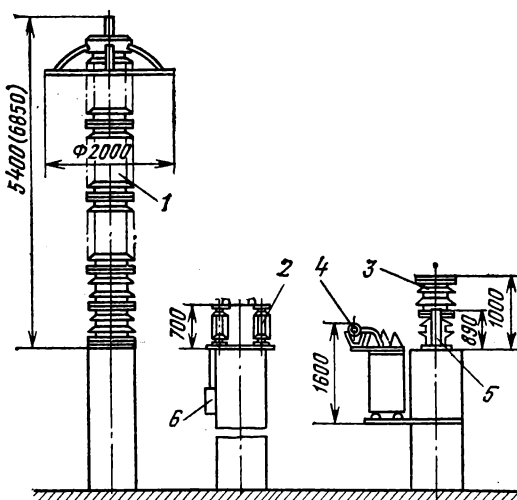


Рис. 28.89. Трансформатор напряжения НДЕ-500-72 (в скобках размер для трансформатора НДЕ-750-72):

1 — делитель напряжения; 2 — однополюсный разъединитель; 3 — электромагнитное устройство; 4 — заградитель высокочастотный; 5 — разрядник вентильный; 6 — привод

Список литературы

- 28.1. ГОСТ 7746-78. Трансформаторы тока. Общие технические требования.
28.2. Казанский В. Е. Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматики. М.: Энергия, 1978. 262 с.

- 28.3. Казанский В. Е. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. М.: Энергия, 1969. 183 с.
- 28.4. Бачурин Н. И. Трансформаторы тока. Л.: Энергия, 1964. 376 с.
- 28.5. Дымков А. М., Кибель В. М., Тишенин Ю. В. Трансформаторы напряжения. М.: Энергия, 1975. 202 с.
- 28.6. Федосеев А. М. Релейная защита электро-энергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
- 28.7. Чунихин А. А. Электрические аппараты. — М.: Энергия, 1975. 647 с.
- 28.8. Сирота И. М. Переходные режимы работы трансформаторов тока. Киев: Изд-во АН УССР, 1961. 192 с.
- 28.9. Зубков В. П., Крастина А. Д. Оптико-электронные методы измерения тока и напряжения в установках высокого напряжения. М.: Информэнерго, 1975. 96 с.
- 28.10. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. М.: Энергия, 1976. 544 с.
- 28.11. Переходные режимы работы каскадного трансформатора тока с дополнительной ступенью/А. Д. Дроздов, А. Н. Висящев, В. В. Могирев, С. С. Смирнов, В. Г. Радионов. — Электричество, 1973, № 2.
- 28.12. Основы теории электрических аппаратов/Под ред. Г. В. Буткевича. М.: Высшая школа, 1970. 600 с.
- 28.13. Чунихин А. А., Щеглов И. П. Ферромагнитный трансформатор тока для измерений в переходном режиме. — Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, 1976, вып. 10 (66).
- 28.14. Соколова Р. Н. Емкостный трансформатор напряжения с коррекцией. — Электрические станции, 1979, № 12, с. 17—20.
- 28.15. ГОСТ 1983-77. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.
- 28.16. ГОСТ 18685-73. Трансформаторы тока и напряжения. Термины и определения.
- 28.17. Афанасьев В. В. и др. Трансформаторы тока. — Л.: Энергия, 1980. — 344 с.
- 28.18. Чунихин А. А., Жаворонков М. А. Аппараты высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1985. 426 с.

Раздел 29

АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НИЗКОГО НАПЯЖЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

29.1. Общие вопросы Классификация (538). Термины и определения (538)	533	менного тока (559). Гибридные и синхронные коммутационные устройства (560)	
29.2. Электромагниты коммутационных аппаратов Методы расчета электромагнитов (539). Расчет магнитных цепей (540). Магнитные проводимости немагнитных зазоров (540). Магнитное сопротивление магнитопровода (543). Схема замещения магнитной цепи (544). Расчет обмоток (545). Основные характеристики электромагнитов (546). Электромагнитные муфты и электромагниты для станков (549)	539	29.5. Контактторы и пускатели Примерный порядок расчета контактора и пускателя (561). Контактторы постоянного тока (563). Контактторы переменного тока (563). Пускатели переменного тока (564)	561
29.3. Электрические контакты и токоведущие части Основные сведения (549). Расчет контактов и токоведущих частей в номинальном режиме (553). Расчет контактов и токоведущих частей в режиме протекания сверхтока (554). Электрический износ контактов (556). Эквивалентные продолжительные токи (557)	549	29.6. Автоматические выключатели и предохранители Некоторые разновидности автоматических выключателей (567). Расцепители (570). Плавкие предохранители (571)	567
29.4. Дугогасительные устройства Общие сведения (557). Зависимости для расчета дугогасительных устройств постоянного тока (557). Зависимости для расчета дугогасительных устройств пере-	557	29.7. Командоаппараты, рубильники, переключатели 29.8. Бесконтактные аппараты управления Магнитные усилители (576). Полупроводниковые усилители и реле (580). Бесконтактные устройства для управления электропроводами (581). Стабилизаторы (581)	574 576
		29.9. Датчики Индуктивные датчики (582). Трансформаторные датчики (584). Резистивные датчики (584). Емкостные датчики (585)	582
		Список литературы	585

29.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Классификация

По назначению: аппараты управления режимом работы электрооборудования (контактторы и пускатели), электромагнитные муфты, командоаппараты и переключатели; аппараты распределительных устройств (автоматические выключатели и предохранители); аппараты регулирования и контроля (стабилизаторы и датчики).

По типу коммутационного узла: контактные, бесконтактные и гибридные.

В бесконтактном аппарате коммутационный узел может выполняться на магнитных или полупроводниковых элементах.

В гибридном аппарате коммутационный узел обычно имеет механические контакты в совокупности с полупроводниковыми или магнитными элементами.

С точки зрения основной функции аппаратов — включение и отключение электрической цепи — можно выделить дуговые (при отключении электрической цепи на контактах образуется дуга) аппараты и бездуговые.

Наиболее употребительный привод для большинства типов контактных аппаратов — электромагнитный.

Термины и определения

Номинальный ток $I_{ном}$ — наибольшее значение тока (действующее), который аппарат

способен длительно пропускать при заданном номинальном напряжении, номинальной частоте и номинальной температуре окружающей среды при условии, что температура нагрева частей аппарата не должна превышать допустимую температуру для длительного режима работы. Номинальные токи устанавливаются по пятому нормальному ряду чисел с коэффициентом нарастания $\sqrt[5]{10}$, т.е. 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160 А и т.д.

Номинальное напряжение рекомендуется для:

переменного тока

36, 127, 220, 380, 660 В;

постоянного тока

24, 48, 110, 220, 440, 750 В.

Время дуги — время от момента возникновения дуги на контактах до ее полного погасания.

Режимы работы — продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный. При продолжительном режиме аппарат работает в течение времени, достаточного для достижения всеми его частями установившейся температуры. При кратковременном режиме температура частей аппарата не успевает достигнуть установившегося значения.

Термическая стойкость аппарата и его частей определяется действующим значением тока термической стойкости, протекание которого в течение времени термической стойкости (1,5 или 10 с) не вызовет нагрева токоведущих частей выше допустимой.

Электродинамическая стойкость аппарата — способность аппарата пропускать во включенном положении наибольший пик тока без самопроизвольного отключения и без механического или электрического разрушения.

Предельный ток отключения — наибольшее амплитудное значение тока в цепи, который способен отключить аппарат и успешно погасить дугу.

29.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Электромагниты преобразуют электрическую энергию протекающего по их обмотке тока в механическую энергию, вызывающую появление электромагнитной тяговой силы $F_{эм}$ или вращающего момента $M_{вр}$ на их подвижной системе (якоре). Линейные перемещения или углы поворота этих систем небольшие (обычно до нескольких сантиметров или нескольких десятков градусов).

На рис. 29.1 приведены наиболее характерные разновидности электромагнитных систем, применяемых в электрических аппаратах: клапанная (а); броневая (б); Ш-образная (в), чаще применяемая на переменном токе и выполняемая из шихтованной стали; открытый (без внешнего магнитопровода) соленоидный электромагнит (г); с поворотным якорем (д); открытая с ферромагнитными токоведущими пластинами (е), применяемая в магнитоуправляемых контактах (герконах); плоская для многоконтактных реле (ж); с Z-образным якорем для реле защиты с высоким коэффициентом возврата (з).

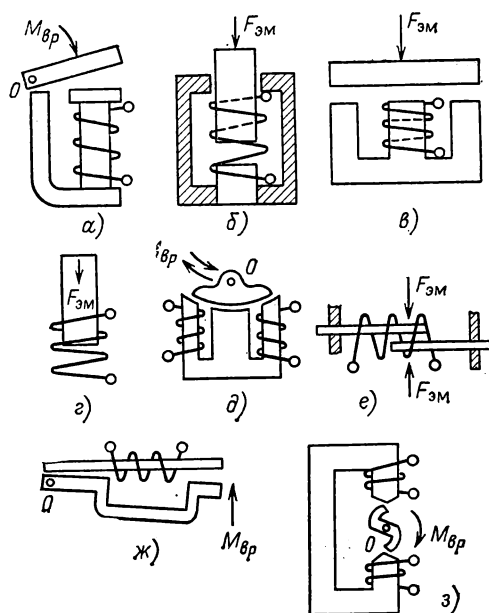


Рис. 29.1. Характерные разновидности электромагнитных систем аппаратов

Методы расчета электромагнитов

В общем случае расчет электромагнитов производится на основе решений уравнений электромагнитного поля [29.5]: первого уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j},$$

связывающего электрические и магнитные параметры в статических режимах, и второго уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t,$$

определяющего взаимосвязь между указанными параметрами в режиме изменения магнитного поля. В этих зависимостях: $\mathbf{H}$ и $\mathbf{B}$ — напряженность и индукция магнитного поля; $\mathbf{E}$ — напряженность электрического поля; $\mathbf{j}$ — плотность тока; t — время.

Первое уравнение Максвелла, выраженное в интегральной форме, представляет собой закон полного тока:

$$\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = \oint_S \mathbf{j} d\mathbf{S} = I_{\text{полн}},$$

где S — поверхность, ограниченная контуром обхода l ; $I_{\text{полн}}$ — полный ток.

Третье уравнение, полученное на основе теоремы Гаусса и являющееся основным исходным при расчетах статических магнитных полей в электромагнитных устройствах, — это уравнение Пауссона:

$$\nabla^2 A = -\mu_2 \mu_0 j,$$

где A — векторный магнитный потенциал; $\mu_2 \mu_0$ — абсолютная магнитная проницаемость; $\mathbf{j}$ — плотность тока в точке, в которой стягивается контур.

В областях, свободных от макротоков ($j=0$), уравнение Пауссона переходит в уравнение Лапласа:

$$\nabla^2 A = 0.$$

Переход от потенциала A магнитного поля, найденного при решении уравнения Лапласа, к магнитному потоку Φ осуществляется путем интегрирования по замкнутому контуру (для области которого находится поток Φ):

$$\Phi = \oint_l A \, dl.$$

В областях пространства электромагнитов, свободных от электрических токов (не занятых обмотками), магнитное поле можно описать не векторным, а скалярным магнитным потенциалом V_m , который также подчиняется уравнению Лапласа. Переход от V_m к напряженности магнитного поля H осуществляется с помощью зависимости

$$H = -\text{grad } V_m.$$

Уравнения Лапласа и Пауссона дополняются уравнениями связи, определяемыми зависимостью индукции ферромагнитного материала B от напряженности H поля в нем — $B = f(H)$.

Расчет магнитных цепей

В ферромагнитных участках электромагнитов сосредоточиваются магнитные потоки, и обычно лишь относительно небольшая их доля проходит по параллельным воздушным путям. Это дает право замещать электромагнитные устройства эквивалентной магнитной цепью, прибегая к расчетам магнитного поля лишь в воздушных зазорах электромагнитов для определения их суммарного магнитного сопротивления или проводимости. Они включаются в схему замещения магнитной цепи (рис. 29.2).

Основные уравнения магнитной цепи

$$\frac{d^2 U_{mx}}{dx^2} - \lambda_\sigma R_m^0 U_{mx} = 0;$$

$$\frac{d^2 \Phi_x}{dx^2} - \lambda_\sigma R_m^0 \Phi_x - F \lambda_\sigma = 0,$$

где U_{mx} — разность скалярных магнитных потенциалов на рассматриваемом участке; λ_σ — удельная (на единицу длины) магнитная проводимость для потоков рассеяния; R_m^0 — магнитное сопротивление участка на единицу длины; F — МДС обмотки.

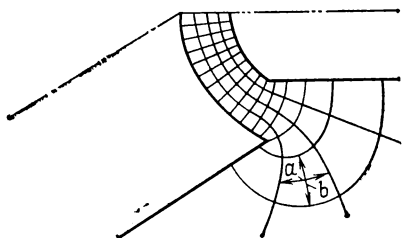


Рис. 29.2. Графическое изображение картины магнитного поля между полюсами

Расчет магнитных цепей на основе решения этих уравнений можно производить методами двойного графического интегрирования и численного интегрирования [29.3].

При заданных размерах стального магнитопровода и немагнитных (воздушных) зазоров расчет производится с целью определения магнитного потока Φ_δ в рабочем воздушном зазоре при известной МДС (F) обмотки (прямая задача) или, наоборот, расчет сводится к определению F при известном Φ_δ (обратная задача). Для этого предварительно рассчитываются магнитные проводимости или сопротивление рабочих немагнитных (воздушных) зазоров, в которых создается электромагнитная тяговая сила, а также магнитные проводимости нерабочих зазоров и рассеяния.

Магнитные проводимости немагнитных зазоров

В общем случае они могут быть получены на основе решения уравнения Лапласа при соответствующих граничных условиях. В практике инженерных расчетов при известных геометрических размерах и конфигурации полюсов магнитные проводимости воздушных зазоров между полюсами определяются по одному из трех методов, в принципе согласующихся с уравнением Лапласа:

- а) по аналитическим или эмпирическим формулам;
- б) по формулам для вероятных путей потока;
- в) по построенной на графике или определенной опытным путем (например, методом моделирования на проводящей бумаге) картине магнитного поля.

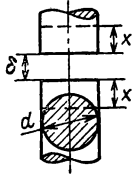
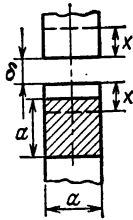
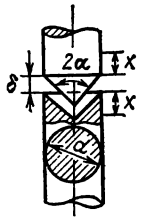
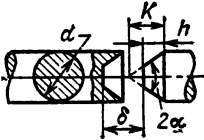
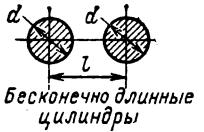
В табл. 29.1 приведены формулы для магнитных проводимостей некоторых наиболее типичных воздушных зазоров, встречающихся в электрических аппаратах. Формулы получены либо аналитически, либо путем аппроксимации экспериментальных зависимостей.

Метод вероятных путей потока основан на разбиении пространства между полюсами на простые геометрические фигуры. Полная проводимость определяется, как сумма проводимостей элементарных геометрических фигур, если потоки, проходящие по этим фигурам, параллельны друг другу. Суммарная проводимость последовательно соединенных фигур (для потока) определяется, как и для электрической проводимости, по закону последовательного соединения сопротивлений.

Метод графического построения картины магнитного поля применяется для плоскопараллельных магнитных полей. При построении соблюдаются следующие основные правила:

- а) средние размеры a и b криволинейных четырехугольников (рис. 29.2), заключенных между соседними эквипотенциальными линиями и линиями индукции, должны быть равны друг другу;
- б) линии индукции и эквипотенциальные линии должны пересекаться под прямым углом;
- в) линии магнитной индукции выходят из поверхности полюса под прямым углом; линия, выходящая из любого угла, делит его пополам (поверхность полюса принимается эквипотенциальной). В принципе эти правила удовлетво-

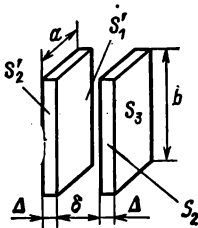
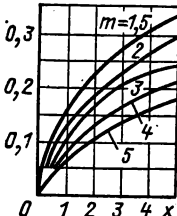
Таблица 29.1. Формулы магнитной проводимости некоторых немагнитных (воздушных) зазоров различной формы

Форма полюса	Участки поверхности, между которыми вычисляется проводимость	Магнитная проводимость, Гн
	Торцы	$\Lambda = \mu_0 d \left(\frac{\pi d}{4\delta} + \frac{0,36d}{2,4d + \delta} + 0,48 \right)$
	Торцы	$\Lambda = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta} \left(\text{при } \frac{\delta}{d} < 0,2 \right)$
	Боковые поверхности на расстоянии x от торцов	$\Lambda = \mu_0 \frac{x d}{0,28\delta + 0,4x}$
	Торцы	$\Lambda = \mu_0 a \left[\frac{a}{\delta} + \frac{0,36}{2,4 + \delta/a} + \frac{0,14}{\ln(1,05 + \delta/a)} + 0,48 \right]$
	Торцы	$\Lambda = \mu_0 \frac{a^2}{\delta} \left(\text{при } \frac{\delta}{a} < 0,2 \right)$
	Боковые поверхности на расстоянии x от торцов	$\Lambda = \mu_0 \frac{x a}{0,17\delta + 0,4x}$
	Конусные поверхности	$\Lambda = \mu_0 d \left(\frac{\pi d}{4\delta \sin^2 \alpha} - \frac{0,157}{\sin^2 \alpha} + 0,75 \right)$
	Боковые поверхности на расстоянии x от торцов	Вычисляются по формуле, указанной в третьей строке настоящей таблицы
	Поверхности усеченных конусов	$\Lambda = \mu_0 d \left\{ \frac{\pi d}{40 \sin^2 \alpha} - \frac{0,157}{\sin^2 \alpha} - \frac{1,97}{\sin^2 \alpha} (1 - \eta_1) \times \right.$ $\times \left[\frac{0,6 - \eta_1}{\ln \left(1 + \frac{\delta}{d} \sin^2 \alpha \right)} + \frac{1 + \eta_1}{\ln \left(1 + 5 \frac{\delta}{d} \sin 2\alpha \right)} \right] + 0,75$ Обозначить $\eta = h/K$, если $\delta/d < \eta + \sin 2\alpha$, то $\eta_1 = \eta + 0,29 \operatorname{tg} (1 + \eta)$; если $\delta/d > \frac{\eta}{\sin 2\alpha}$, то $\eta_1 = \frac{\delta}{d} \sin 2\alpha$; Если $\delta/d > (1/2) \operatorname{tg} \alpha$, то $\eta_1 = 1$
 Бесконечно длинные цилиндры	Боковые поверхности цилиндров (на единицу длины) при длине цилиндров $\geq d$	$\lambda_0 = \frac{\pi \mu_0}{\ln \frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{d}}$ Для цилиндра конечной длины формулу следует рассматривать как приближенную

Продолжение табл. 29.1

Форма полюса	Участки поверхности, между которыми вычисляется проводимость	Магнитная проводимость, Гн																											
	Боковая поверхность бесконечного цилиндра и бесконечная плоскость (на единицу длины)	$\lambda_0 = \frac{\pi \mu_0}{\ln \frac{l + \sqrt{l^2 - r^2}}{r}}$																											
	Боковая поверхность бесконечно длинной полосы шириной H и бесконечно длинный цилиндр (на единицу длины)	$\lambda_0 = \frac{2\pi \mu_0 K_M}{\ln \frac{l + \sqrt{l^2 - r^2}}{r}}$ <table><tr><th rowspan="2">H/l</th><th colspan="3">Значения K_M для l/r</th></tr><tr><th>1,5</th><th>2,5</th><th>5,0</th></tr><tr><td>1</td><td>0,4</td><td>0,3</td><td>0,25</td></tr><tr><td>2</td><td>0,7</td><td>0,55</td><td>0,45</td></tr><tr><td>3</td><td>0,8</td><td>0,7</td><td>0,55</td></tr><tr><td>4</td><td>0,85</td><td>0,75</td><td>0,65</td></tr><tr><td>5</td><td>0,9</td><td>0,85</td><td>0,7</td></tr></table>	H/l	Значения K_M для l/r			1,5	2,5	5,0	1	0,4	0,3	0,25	2	0,7	0,55	0,45	3	0,8	0,7	0,55	4	0,85	0,75	0,65	5	0,9	0,85	0,7
H/l	Значения K_M для l/r																												
	1,5	2,5	5,0																										
1	0,4	0,3	0,25																										
2	0,7	0,55	0,45																										
3	0,8	0,7	0,55																										
4	0,85	0,75	0,65																										
5	0,9	0,85	0,7																										
 Бесконечно длинные цилиндры	Проводимость между двумя бесконечно длинными цилиндрическими поверхностями (на единицу длины)	$\lambda_0 = \frac{2\pi \mu_0}{\ln D/d}$																											
	Торцевые поверхности одинаковых полюсов прямоугольной формы	$\Lambda = \mu_0 \frac{b}{\varphi} \ln [1 + a/R],$ где φ выражен в радианах																											
	Полная проводимость между цилиндрическим сердечником и прямоугольным ярком, расположенным под углом	Между торцом полюса и ярком $\Lambda_1 = \frac{2\pi \mu_0}{\varphi} (R_0 - \sqrt{R_1 R_2})$ Между ребром полюсного наконечника и ярком $\Lambda_2 = \frac{\pi^2 \mu_0}{\left(\frac{\pi^2}{2} + 1\right)^3} \left[r(2 + \pi) + \frac{\pi}{2} R_0 \operatorname{tg} \varphi \right]$ Между боковой поверхностью полюсного наконечника и ярком $\Lambda_3 = 2\mu_0 h \left[1 + \frac{2r}{\sqrt{\left(\frac{h}{2} + R_1 \operatorname{tg} \varphi\right) \left(\frac{h}{2} + R_2 \operatorname{tg} \varphi\right)}} \right]$																											

Продолжение табл. 29.1

Форма полюса	Участки поверхности, между которыми вычисляется проводимость	Магнитная проводимость, Гн
	Проводимость между параллельными плоскими поверхностями	Между обращенными друг к другу внутренними поверхностями S_1 и S_1 $\Lambda = \frac{\mu_0}{\delta} \left(a + \frac{0.307\delta}{\pi} \right) \left(b + \frac{0.307\delta}{\pi} \right)$ Между поверхностями S_2 и S_2, лежащими в одной плоскости $\Lambda = \frac{\mu_0 b}{2\pi} \ln [m^2 - 1 + 2m \sqrt{m^2 - 1}],$ где $m = (2\Delta + \delta)/\delta$ (получено при условии $b/\delta \rightarrow \infty$) Между поверхностями S_2 и S_3, обращенными в разные стороны, $\Lambda = \mu_0 \lambda_0,$ где λ_0 находится по графику $x = a/\delta$; $m = (2\Delta + \delta)/\delta$
		

ряют уравнению Лапласа и граничным условиям его решения, если считать магнитное сопротивление ферромагнитных полюсов $R_{\text{м}0}$ равным нулю и их поверхности эквипотенциальными.

По построенной картине магнитного поля определяется число трубок потока между полюсами m (на рис. 29.2, $m=8$) и число эквипотенциальных поясов (на рис. 29.2 $n=2$). Тогда результирующая проводимость между полюсами на единицу длины, Гн/м, в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа,

$$\Lambda_0 = \mu_0 m/n,$$

где $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

Чем гуще сетка построенной картины магнитного поля, тем точнее результат расчета магнитной проводимости.

Магнитное сопротивление магнитопровода

В условиях неизменяющегося магнитного потока (по обмотке протекает постоянный ток) магнитное сопротивление $R_{\text{м}}$, Гн $^{-1}$, участка магнитопровода длиной l , м, и сечением S , м 2 , равно:

$$R_{\text{м}} = H/BS,$$

где B и H — индукция, Тл, и напряженность магнитного поля, А/м.

Если ввести понятие об удельном магнитном сопротивлении $\rho_{\text{м}}$, м/Гн,

$$\rho_{\text{м}} = H/B = (\mu_0 \mu_r)^{-1},$$

то получим

$$R_{\text{м}} = \rho_{\text{м}} l/S.$$

Относительную магнитную проницаемость μ_r электротехнических магнитомягких материалов можно определить по кривым рис. 29.3.

На рис. 29.4 даны зависимости удельного магнитного сопротивления $\rho_{\text{м}}$ от индукции для некоторых сталей.

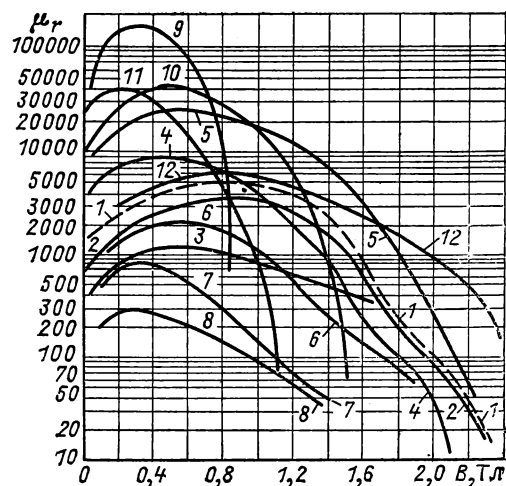


Рис. 29.3 Кривые относительной магнитной проницаемости магнитомягких материалов:

1 — сталь 10864; 2 и 3 — стали марок 10880 и 20880; 4 — сталь марки 1511; 5 — сталь 3413; 6 — чугун ковкий отожженный; 7 — чугун серый отожженный; 8 — чугун неотожженный; 9 — пермаллой 79НМ; 10 — пермаллой 60НП; 11 — пермаллой 80НХС; 12 — пермендюр

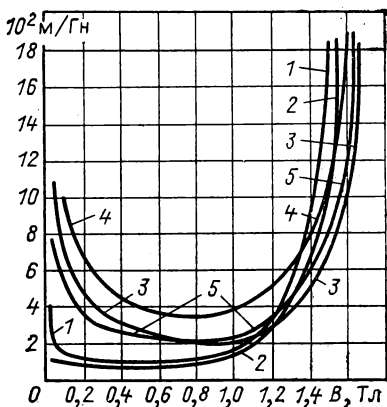


Рис. 29.4. Зависимости удельного магнитного сопротивления от индукции:

1 — сталь 1561; 2 — сталь 1511; 3 — сталь 20880; 4 — сталь 10864; 5 — сталь 1212

Магнитное сопротивление при синусоидальном магнитном потоке

$$Z_M = R_M + jX_M,$$

где R_M и X_M — активная и реактивная составляющие магнитного сопротивления.

Реактивная составляющая

$$X_M = 2P_c / \omega B_m^2 S^2,$$

где B_m — амплитудное значение индукции; ω — угловая частота тока в намагничивающей катушке; S — сечение магнитопровода; P_c — потери в магнитопроводе (потери в стали).

Потери в стали магнитопровода, Вт, на участке длиной l , м,

$$P_c = 2 \left[\sigma_r \frac{f}{100} + \sigma_v \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] B^2 S_c l \gamma_c,$$

где f — частота тока в намагничивающей катушке, Гц; B — действующее значение индукции в магнитопроводе, Тл; γ_c — плотность стали, кг/м³; S — поперечное сечение стали.

Коэффициенты потерь на гистерезис σ_r и вихревые токи σ_v приведены в табл. 29.2.

Таблица 29.2. Коэффициенты потерь σ_r и σ_v листовых сталей

Толщина листа, мм	2,0	1,5	1,0	0,5	0,35
σ_r	4,4	4,4	3,6—4,3	2,5—4,2	1,6—2,3
σ_v	8,9	5,0	4,2—14	1,2—4,8	0,4—0,6

Когда на магнитопроводе расположена замкнутая обмотка или короткозамкнутый виток ($\omega = 1$), то эквивалентное магнитное сопротивление на соответствующем участке магнитной цепи

$$Z_{M,\Sigma} = Z_M + Z_{M,K},$$

где

$$Z_{M,K} = R_{M,K} + jX_{M,K};$$

$$R_{M,K} = \frac{\omega^2 x}{r^2 + x^2}; \quad X_{M,K} = \frac{\omega^2 r}{r^2 + x^2};$$

ω — число витков обмотки; r и x — активное и индуктивное электрическое сопротивление обмотки, Ом.

Схема замещения магнитной цепи

Отдельные элементы магнитной цепи (участки магнитопровода, немагнитные, воздушные зазоры и промежутки) изображаются на схеме замещения (рис. 29.5) в виде магнитных сопро-

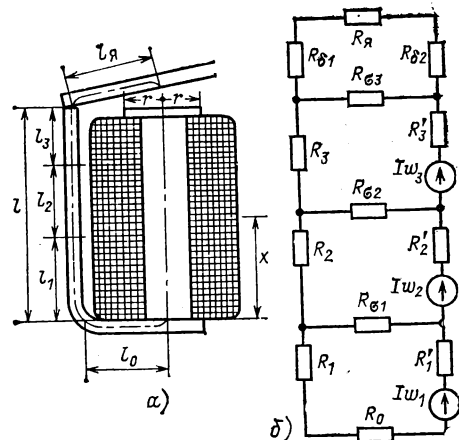


Рис. 29.5. Магнитная цепь (а) и схема ее замещения (б)

тивлений R_M , а намагничивающие обмотки с током — в виде источников МДС F . Обычно магнитные сопротивления рабочих зазоров полагаются сосредоточенными, а магнитные сопротивления рассеяния с боковых граней магнитопровода — распределенными. Последние заменяются при расчете несколькими сосредоточенными сопротивлениями. Распределенную МДС в схеме замещения заменяют также несколькими сосредоточенными МДС. Точность решения повышается с увеличением количества разбиений распределенных МДС и магнитных сопротивлений на соответствующие им элементарные сосредоточенные магнитные сопротивления и МДС. В схеме замещения допустимо оперировать с магнитными проводимостями вместо магнитных сопротивлений.

Магнитные сопротивления рассеяния и МДС отдельных секций обмотки в схеме замещения (рис. 29.5) выражаются так:

$$R_{\sigma 1} = 1/\lambda l_1; \quad F_1 = F l_1/l \text{ и т. д.}$$

Здесь λ — удельная проводимость рассеяния с боковых поверхностей сердечника, через которую замыкаются потоки, не проходящие через рабочий воздушный зазор.

Схема замещения магнитной цепи переменного тока составляется аналогично предыдущему с той лишь разницей, что вместо активных магнитных сопротивлений в нее включаются комплексные магнитные сопротивления Z_M .

Расчет проводится на основе законов Кирхгофа, составляемых относительно магнитных потоков, магнитных сопротивлений и МДС.

Для магнитных цепей электромагнитов постоянного тока:

$\Sigma \Phi = 0$ (для каждого узла схемы замещения);

$\Sigma (F_i - \Phi_i R_{Mi}) = 0$ (для каждого замкнутого контура схемы замещения).

Здесь Φ_i , R_{Mi} и F_i — магнитный поток, магнитное сопротивление и МДС i -го участка контура.

Разность магнитных потенциалов между двумя точками схемы замещения

$$U_M = \sum_k (F_k - \Phi_k R_{Mk}).$$

Суммирование проводится по участку ветви, соединяющей выбранные при расчете точки. Связь между комплексными величинами $\underline{U}_M$, $\underline{\Phi}_m$ и $\underline{F}$ для магнитной цепи электромагнита переменного тока выражается так:

$$\sum \underline{\Phi}_m = 0; \quad \sum_i (\sqrt{2} \underline{F}_i - \underline{\Phi}_{mi} Z_{Mi}) = 0;$$

$$\sqrt{2} \underline{U}_M = \sum_k (\sqrt{2} \underline{F}_k - \underline{\Phi}_{mk} Z_{Mk}).$$

В схеме замещения магнитной цепи, которая рассчитывается аналогично электрической цепи, магнитному потоку, МДС и магнитному сопротивлению соответствуют в электрической схеме ток, ЭДС и электрическое сопротивление.

Прямая задача расчета магнитной цепи, когда по заданному потоку Φ_δ в рабочем воздушном зазоре определяется МДС обмотки с учетом зависимости магнитного сопротивления стали магнитопровода от индукции, решается в следующем порядке (метод последовательных приближений).

а) Магнитное сопротивление участков магнитопровода принимается равным нулю. Рассчитывают схему замещения и находят потоки в отдельных звеньях магнитной цепи, а также F (первое приближение).

б) Магнитным потокам первого приближения соответствуют определенные индукции на отдельных участках магнитопровода. Зная их, по кривым намагничивания стали находят удельные магнитные сопротивления (или магнитные проводимости) на участках и затем магнитные сопротивления магнитопровода этих участков. Повторяют расчет схемы замещения уже с учетом сопротивлений стали на участках и находят распределение потоков и F во втором приближении.

в) По найденным потокам второго приближения и соответствующим им индукциям на участках находят уточненные значения сопротивлений стали на участках и проводят расчет схемы замещения в третьем приближении и т. д. Дальнейшие расчеты в следующем приближении проводят аналогичным образом до тех пор, пока разница в значениях F и потоков на участках в двух соседних приближениях будет несущественной.

При расчете магнитных цепей электромагнитов переменного тока необходимо учитывать фазовый сдвиг Φ_δ и F , который наблюдается благодаря наличию реактивной слагающей магнитного сопротивления магнитопровода. Для этих цепей определяют амплитуду среднего по

длине потока $\Phi_{срм}$ и фазовый сдвиг между $\Phi_{срм}$ и F .

Когда обмотка в схеме замещения разбита на n участков, то

$$\Phi_{срм} = w \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{l_k} \Phi_{im},$$

где l_i — длина i -го участка намагничивающей обмотки; l_k — длина обмотки.

Обратная задача расчета магнитной цепи, когда по заданной МДС обмотки F находится Φ_δ , решается как прямая задача для нескольких значений Φ_δ . Каждому такому значению Φ_δ соответствует свое расчетное значение F . Построив по этим расчетным значениям зависимость $\Phi_\delta = f(F)$, находят по графику поток Φ_δ , соответствующий заданной МДС F .

Расчет обмоток

При заданных сечении обмоточного окна Q , поперечном сечении обмоточного провода q , коэффициенте заполнения по меди K_M , длине среднего витка обмотки l , удельном сопротивлении материала провода ρ число витков и электрическое сопротивление обмотки определяют по формулам

$$w = QK_M/q; \quad R = \rho lw/q;$$

$$K_M = Q_K/Q = K_y \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{d + 2\Delta_n} \right)^2,$$

где Q_K — суммарное сечение провода обмотки (сечение меди); d — диаметр провода; Δ_n — толщина изоляции на одну сторону; $K_y = 0,7 \div 0,95$ — коэффициент укладки.

В установившемся режиме средняя по объему температура нагрева обмотки определяется по формуле, полученной на основе уравнения Ньютона:

$$T = T_{окр} + P/K_T S_o,$$

где P — мощность, выделяемая в обмотке, Вт; S_o — поверхность охлаждения, м².

Зависимость коэффициента теплопередачи от площади поверхности охлаждения обмотки постоянного тока (рис. 29.6) относится к температуре окружающей среды 20 °С.

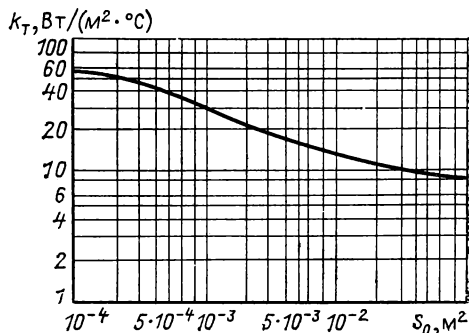


Рис. 29.6. Зависимость K_T от площади поверхности охлаждения катушки при условиях $T_{окр} = 20^\circ \text{C}$ и $T = 70^\circ \text{C}$

Существует эмпирическая формула для температуры нагрева обмотки тяговых электромагнитов контакторов постоянного тока, разделяющая степень влияния внутренней S_v и наружной S_n поверхностей обмотки на процессы теплопередачи:

$$T = T_{\text{окр}} + \frac{P}{K_T^n (S_n + \beta S_v)}.$$

Коэффициент β равен:

для бескаркасных обмоток 0,9;

для обмоток на изолированной металлической гильзе 1,7;

для обмотки, намотанной на изолированный сердечник, 2,4.

Коэффициент теплопередачи с наружной поверхности обмотки в условиях естественного охлаждения воздуха зависит от соотношения длины обмотки l и ее наружного диаметра D . Он приближенно равен:

$$K_T^n = 25 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)} \text{ при } l/D < 1;$$

$$K_T^n = 20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)} \text{ при } l/D \approx 1;$$

$$K_T^n = 16 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)} \text{ при } l/D > 1.$$

Коэффициент теплопередачи с поверхности обмоток зависит от превышения температуры τ , равного разности между температурой нагрева поверхности и температурой окружающей среды. Эта зависимость приближенно выражается:

$$K_T \approx (K_T)_{\tau=50^\circ\text{С}} [1 + 0,005 (\tau - 50)].$$

Приведенные зависимости коэффициента теплопередачи можно использовать также для приближенных расчетов обмоток электромагнитов переменного тока, если за поверхность охлаждения принимать лишь наружную поверхность обмотки.

При известной МДС обмотки F выделяемая в ней мощность равна:

$$P = F^2 \rho l / QK_M.$$

Для обмоток постоянного тока, когда заданы напряжение на обмотке и ее МДС (U , F), сечение провода q и число витков w равны:

$$q = F \rho l / U; \quad w = QK_M / q.$$

Когда обмотка включается в цепь последовательно с каким-либо элементом и заданы ток I и МДС F , то число витков и сечение провода находят по формулам:

$$w = F / I; \quad q = QK_M / q.$$

Для обмоток переменного тока, когда заданы напряжение U , МДС обмотки F , амплитуда среднего значения потока $\Phi_{\text{срм}}$ и угол φ между векторами $\Phi_{\text{срм}}$ и F , число витков обмотки w и сечение обмоточного провода q можно определить по формулам:

$$w = \frac{U}{4,44 f \Phi_{\text{срм}}} \sqrt{\cos^2 \varphi + \left(\sin^2 \varphi + \right.}$$

$$\left. + \frac{\rho l}{QK_M} \frac{F}{4,44 f \Phi_{\text{срм}}} \right)^2;$$

$$q = QK_M / w.$$

Когда можно пренебречь активным сопротивлением провода обмотки в сравнении с ее индуктивным сопротивлением,

$$w = U / 4,44 f \Phi_{\text{срм}}.$$

Основные характеристики электромагнитов

Тяговая сила $P_{\text{эм}}$, развиваемая электромагнитом, вычисляется по формуле, полученной на основе баланса энергии электромагнита (энергетическая формула):

$$P_{\text{эм}} = -0,5 F_\delta^2 d\Lambda_\delta / d\delta,$$

где $F_\delta = \Phi_\delta / \Lambda_\delta$ — МДС, приходящаяся на рабочий воздушный зазор, А; $d\Lambda_\delta / d\delta$ — производная магнитной проводимости рабочего воздушного зазора Λ_δ , Гн, по этому зазору δ , м.

В условиях равномерного распределения индукции в рабочем воздушном зазоре энергетическая формула преобразуется в формулу Максвелла:

$$P_{\text{эм}} = B_\delta^2 S / 2\mu_0,$$

где $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; B_δ — индукция в воздушном зазоре, Тл; S — площадь полюса, м².

На рис. 29.7 приведены типичные статические тяговые характеристики некоторых электромагнитов с примерно одинаковой массой стали и меди.

Тип электромагнита и вид его тяговой характеристики выбираются в соответствии с видом характеристики противодействующих сил того механизма, в котором устанавливается тяговый электромагнит. Так, в случае «пологой» противодействующей характеристики целесообразно применить броневой электромагнит, в случае «крутой» характеристики — электромагнит клапанного типа или П-образный электромагнит.

На рис. 29.8 представлен типичный вид характеристики противодействующих сил P_n

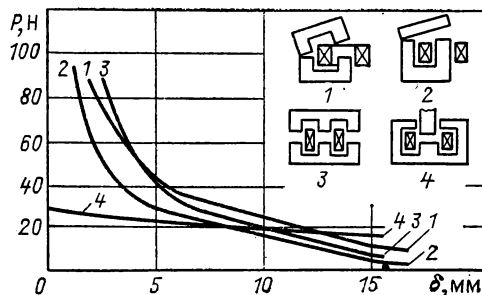


Рис. 29.7. Статические тяговые характеристики некоторых типичных электромагнитов:

1 — П-образный электромагнит с втягивающимся якорем; 2 — электромагнит клапанного типа; 3 — Ш-образный электромагнит; 4 — броневой электромагнит

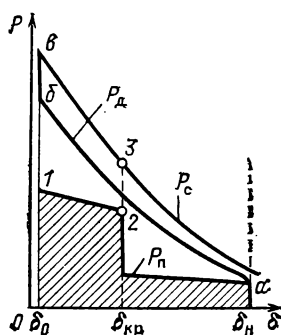


Рис. 29.8. Тяговые и противодействующие характеристики контакторов

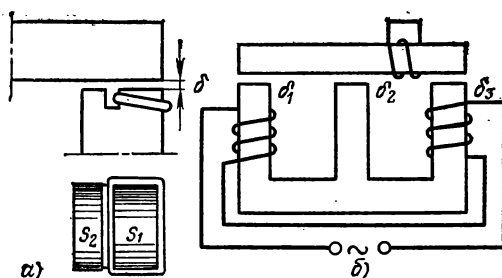


Рис. 29.9. Способы устранения вибрации якоря электромагнита

электромагнитного аппарата с замыкающими контактами, динамической тяговой P_d (точки δ_n —а—б—в) и статической P_c характеристик электромагнита.

Для аппаратов с замыкающими контактами расчетная точка 3 статической характеристики тягового электромагнита выбирается по максимальному значению противодействующей силы (точка 2) при критическом зазоре $\delta_{кр}$, соответствующем моменту замыкания главных контактов. Коэффициент запаса K_a , равный отношению P_c/P_n , при критическом зазоре $\delta_{кр}$ равен:

для удерживающих электромагнитов 1,1—1,2;

для контакторов и пускателей 1,2—1,5.

Коэффициент возврата K_v электромагнитного механизма или аппарата, равный отношению напряжения (тока) отпущения к напряжению (току) трогания (срабатывания), определяется при расчете магнитной системы по отношению указанных значений. Для электромагнита постоянного тока клапанного типа он приближенно равен (см. рис. 29.1, а)

$$K_v \approx \frac{I_{отп}}{I_{ср}} = \sqrt{\frac{P_{отп}}{P_{ср}}} \times \left[\frac{R_{ст}^0 l + \frac{\delta_{отп} l \sqrt{\lambda_0 R_{ст}^0}}{A_0 \operatorname{th} (l \sqrt{\lambda_0 R_{ст}^0})}}{R_{ст}^0 l + \frac{\delta_{ср} l \sqrt{\lambda_0 R_{ст}^0}}{A_0 \operatorname{th} (l \sqrt{\lambda_0 R_{ст}^0})}} \right],$$

где $P_{отп}$ и $P_{ср}$ — противодействующие силы при отпущении и при трогании (соответствуют точки 1 и а на рис. 29.8), Н; $\delta_{отп}$ и $\delta_{ср}$ — рабочие воздушные зазоры при отпущении и срабатывании (соответственно δ_0 и δ_n на рис. 29.8), м; λ_0 — проводимость рассеяния на единицу длины магнитопровода, Гн/м; $R_{ст}^0$ — сопротивление стали на единицу длины магнитопровода, 1/(Гн·м).

Для круглого полюса (обозначения на рис. 29.5)

$$A_0 \approx 2\pi\mu_0 l_{я} [l_{я} - \sqrt{(l_{я} - r)(l_{я} + r)}].$$

Если брать $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, то геометрические размеры в приведенных зависимостях надо выражать в метрах.

При питании обмотки электромагнита от сети переменного тока тяговая сила пульсирует с удвоенной частотой сети, сохраняя неизменное направление. Среднее за период значение тяговой силы определяется по формуле Максвелла, если подставлять в нее действующее значение F_δ .

Для устранения вибрации якоря в электромагнитах переменного тока применяется короткозамкнутый виток на полюсе (рис. 29.9, а) или короткозамкнутая обмотка (виток) на якоре (рис. 29.9, б). В первом случае должно выдерживаться примерное соотношение параметров:

$$S_2/(S_1 + S_2) = 0,75 \div 0,95;$$

$$\frac{r\delta}{\omega\mu_0(S_1 + S_2)} = 0,2 \div 0,4,$$

где S_1 и S_2 — площади охваченной и не охваченной витком частей полюса, м²; r — электрическое сопротивление витка, Ом; δ — воздушный зазор между полюсами [в притянутом состоянии обычно $\delta \approx (4 \div 5) \cdot 10^{-5}$ м]; ω — угловая частота источника питания, рад/с.

Во втором случае при соотношении воздушных зазоров $\delta_1 > \delta_2$; $\delta_1 = \delta_3$ или $\delta_2 = \delta_3 > \delta_1$ и соответствующем выборе других параметров магнитной системы и обмотки на якоре электромагнитная сила будет неизменной во времени

$$P_{эм} = \frac{3}{2} \frac{0,5}{\mu_0} \frac{\Phi_m^2}{S},$$

где $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; Φ_m — амплитудное значение потока.

Время срабатывания электромагнитного механизма

$$t_{ср} = t_{т} + t_{д},$$

где $t_{т}$ — время трогания, измеряемое от момента подачи напряжения на обмотку до момента начала движения якоря; $t_{д}$ — время движения подвижной системы электромагнита.

Когда индуктивность L электромагнита постоянного тока можно полагать примерно постоянной,

$$t_{т} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - I_{т}/I_{у}},$$

где R — активное сопротивление обмотки электромагнита; $I_{у}$ — установившееся значение тока в обмотке ($I_{у} = U/R$; U — напряжение на

обмотке); I_T — ток трогания подвижной системы.

Индуктивность L обмотки при рабочем зазоре, соответствующем отпущенному состоянию якоря, равна

$$L = \Psi / I; \quad L \approx \omega^2 \Lambda_\delta,$$

где $\Psi = \omega \Phi$ — потокосцепление обмотки при токе I ; ω — число витков; Λ_δ — проводимость рабочего зазора.

Последняя зависимость справедлива, когда в электромагните нет рассеяния, сопротивление магнитопровода близко к нулю и вся МДС обмотки приходится на рабочий воздушный зазор.

Когда эти условия не выполняются, время трогания определяется по формуле

$$t_T = \int_0^{I_T} \frac{d\Psi}{U - IR}.$$

Для вычисления интеграла необходимо иметь полученную при расчете магнитной цепи зависимость $\Psi = f(I)$.

Время трогания электромагнита постоянного тока с дополнительной короткозамкнутой обмоткой, сцепленной с тем же потоком, что и намагничивающая обмотка,

$$t_T = \frac{L}{R} \left(1 + \frac{R}{R_{д.п}} \right) \ln \frac{1}{1 - I_T / I_y},$$

$$L = \text{const}$$

и

$$t_T = \left(1 + \frac{R}{R_{д.п}} \right) \int_0^{I_T} \frac{d\Psi}{U - IR}$$

(при насыщенном сердечнике).

Сопротивление короткозамкнутой обмотки $R_{д.п.}$, приведенное к числу витков намагничивающей обмотки ω , равно

$$R_{д.п} = R_d (\omega / \omega_d)^2,$$

где ω_d и R_d — число витков и сопротивление короткозамкнутой обмотки.

Высокую точность расчета времени движения подвижной системы электромагнитного механизма дает графоаналитический метод. Исходные уравнения:

$$U = iR + \Delta\Psi / \Delta t; \quad (a)$$

$$P_{эм} \Delta x = \Delta \frac{mv^2}{2} + P_{п} \Delta x. \quad (б)$$

Здесь $P_{эм}$ — электромагнитная сила, Н; $P_{п}$ — противодействующая сила, Н; m — масса подвижной системы, кг; v — скорость движения подвижной системы, м/с; Δx — ход якоря, м.

Для расчета необходимо иметь в распоряжении семейство статических характеристик $\Psi = f(I)$, построенных для нескольких значений рабочего воздушного зазора (рис. 29.10).

Порядок расчета. На нижней кривой $\Psi = f(I)$, соответствующей максимальному (начальному) воздушному рабочему зазору δ_n , отмечает точку a , соответствующую току трогания. Проводят отрезок ab так, чтобы $\Psi_1 > \Psi_0$, и определяют площадь треугольника

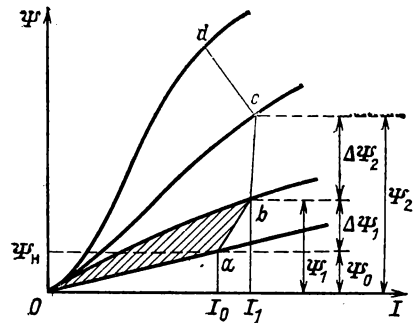


Рис. 29.10. Графическое определение времени движения

S_{0ab} (единица — Вт·с). Работа, совершенная тяговой силой на первом участке,

$$P_{эм1} \Delta x_1 = S_{0ab}.$$

Из уравнения (б) определяют скорость движения якоря в конце первого участка v_1 . Тогда $P_c \Delta x$ вычисляется по заданному закону изменения противодействующей силы. Средняя скорость на первом участке

$$v_{ср1} = (v_0 + v_1) / 2$$

и время движения

$$t_{дв} \rightarrow \Delta t_1 = \Delta x_1 / v_{ср1}$$

определяются по графику приращения потоко-сцепления и тока на первом участке

$$\Delta\Psi_1 = \Psi_1 - \Psi_2; \quad \Delta I_1 = I_1 - I_0.$$

В уравнение (а) подставляют $I = I_0 + \Delta I_1 / 2$, а также $\Delta\Psi_1$ и ΔI_1 . О правильности выбора направления отрезка ab судят по соблюдению равенства при этой подстановке.

Аналогично определяется время движения подвижной системы на втором и других участках. Результирующее время движения находится как сумма найденных отрезков времени $\Delta t_1, \Delta t_2$ и т. д. Значения токов I_0, I_1 и т. д. (рис. 29.10), относящиеся к временам, определяемым при расчете, позволяют построить кривую изменения тока в катушке электромагнита в процессе движения подвижной системы. По известной площади элементарных треугольников, например S_{0ab} , и соответствующим им участкам пути, например Δx_1 , можно найти тяговую силу на отдельных участках пути и построить ее зависимость от времени и от пути, т. е. динамическую тяговую характеристику.

Время отпущения электромагнита при отключении обмотки от источника питания складывается из времени спадания магнитного потока, отсчитываемого от момента разрыва цепи обмотки до момента трогания якоря, и времени возвратного движения якоря $t_{в.д.}$:

$$t_{отп} = t_{сп} + t_{в.д.}$$

Первая слагающая может быть найдена графически интегрированием по формуле

$$t_{сп} = \int_{\Psi_T}^{\Psi_y} \frac{d\Psi}{iR_{д.п}},$$

где Ψ_y — потокосцепление обмотки при установившемся токе; Ψ_r — потокосцепление, соответствующее току трогания при отпускании.

Для расчета необходима зависимость потокосцепления от тока в притянутом состоянии якоря, которая определяется при расчете магнитной цепи.

Приближенная оценка времени возвратного движения якоря без учета влияния магнитного состояния системы производится по формуле

$$t_{в.д} \approx \sqrt{2mx/P_{п.ср}},$$

где m — масса подвижной системы; x — пройденный путь; $P_{п.ср}$ — среднее значение противодействующей силы, под влиянием которой происходит возвратное движение якоря.

Электромагнитные муфты и электромагниты для станков

Наиболее широко распространены фрикционные многодисковые (рис. 29.11) и ферропорошковые электромагнитные муфты. В табл. 29.3 приведены данные некоторых отечественных фрикционных муфт системы ЭТМ.

Порошковые муфты серии МПБ, имеющие частоту вращения вала до 2000 об/мин, допускают возможность регулирования передаваемого момента в диапазоне от 0,1 до 1,0 максимального. В табл. 29.4 представлены параметры таких муфт.

Параметры некоторых электромагнитов серий ЭД, МТ и ЗУ, предназначенных для управления гидравлическими и пневматическими механизмами станков и другого оборудования, представлены в табл. 29.5.

Таблица 29.3. Электромагнитные муфты серии ЭТМ

Габарит муфты	t_0 , мс	$t_{п'}$, мс	τ , мс	$M_{ном}$, Н·м
01	1,2	17	1,2	2,5
02	1,5	25	1,8	4,0
03	1,7	30	2,0	5,3
04	1,9	35	2,5	10
05	2,2	40	3,0	16
06	2,8	50	3,5	25
07	3,0	60	5,0	40
08	3,1	75	6,0	63
09	3,5	100	8,0	100
10	4,1	120	9,0	160
11	4,5	100	16,0	250
12	5,5	100	21,0	400
13	—	130	—	1000
14	—	150	—	1600
15	—	150	—	2500
16	—	150	—	4000

Примечания: 1. Частота вращения n , об/мин, и ток управления $i_{упр}$, А, для некоторых габаритов муфт ЭТМ:

Габарит 0,5	• •	$n = 5000 \div 7000$	$i_{упр} = 0,3 \div 0,4$
» 10	• •	$n = 2800 \div 3600$	$i_{упр} = 0,9 \div 1,2$
» 15	• •	$n = 1600 \div 2500$	$i_{упр} = 4,0 \div 25,6$

2. Обозначения:

τ — постоянная времени цепи управления;
 t_0 — время запаздывания (трогания);
 $t_{п'}$ — время переключения;

$M_{ном}$ — номинальный момент муфты.

3. Цена 15—95 руб.

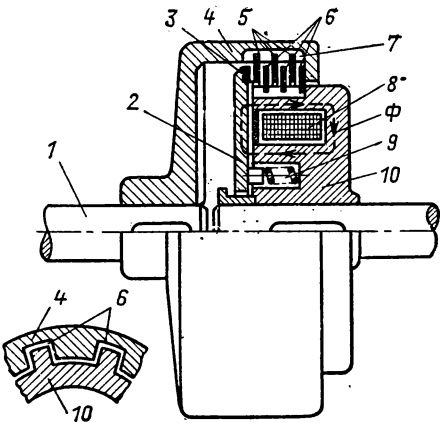


Рис. 29.11. Устройство многодисковой фрикционной муфты:

1 — ведущий и ведомый валы; 3 и 7 — направляющие прорези для фрикционных дисков; 5 и 6 — диски сцепления; 2 — якорь; 8 — обмотка управления; 4 и 10 — несущие элементы, связанные с валами; 9 — возвратная пружина; Φ — рабочий магнитный поток

Таблица 29.4. Порошковые муфты МПБ

Обозначение муфты	МПБ-63-2	МПБ-40-2	МПБ-25-2	МПБ-10-2	МПБ-4-2	МПБ-6-2	МПБ-63-2
Передаваемый момент, Н·см	630	400	250	100	40	20	6,3
Остаточный момент, Н·см	60	30	20	10	2	1,1	0,5
Ток управления, А	45	0,40	0,32	0,22	0,18	0,16	0,16
Срок службы, ч	500	500	1000	1000	500	1000	1000
Масса, кг	5,3	4,2	3,2	1,65	0,95	0,38	0,31

Таблица 29.5. Параметры электромагнитов для станков

Серия	Габарит	Номинальное усилие, Н	Число циклов, 1/ч	Ход якоря, м	Масса, кг	Вид тока	Цена, руб.
ЭД	1	4	2400	0,01	0,49	Переменный	11
	6	25	1200	0,02	1,62	То же	14
	10	160	120	0,04	10	» »	—
	11	250	120	0,04	12	» »	—
	—	—	—	—	—	» »	—
МТ	2	4	2400	0,005	—	» »	5
	5	16	1200	0,01	—	» »	—
	9	160	120	0,015	—	» »	—
ЗУ	2	4	10 000	0,005	0,36	Постоянный	—
	5	16	6000	0,01	1,45	То же	—
	9	100	2400	0,015	6,9	» »	—

29.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ И ТОКОВЕДУЩИЕ ЧАСТИ

Основные сведения

Контакты. Наиболее типичные разновидности коммутационных (замыкаемых и размыкаемых) контактов, применяемых в аппара-

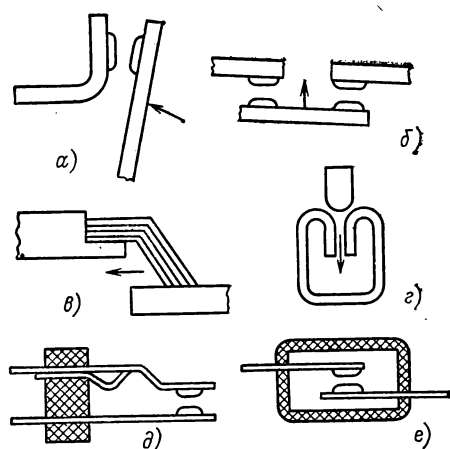


Рис. 29.12. Основные разновидности контактов

тах низкого напряжения, даны на рис. 29.12. Рычажные (а), мостиковые (б), щеточные (в) и врубные (г) контакты применяются в основном в аппаратах на большие номинальные токи (десятки ампер и выше). Контакты с плоскими пружинами (д) и герметизированные (магнитоуправляемые) контакты (е), заключенные в закрытую стеклянную капсулу, применяются преимущественно в малоомощных аппаратах (коммутируемые токи до 5—10 А). В зависимости от характера соприкосновения контактирующих поверхностей контакты могут быть точечными, линейными и плоскими.

Основные виды применяемых контактных материалов: чистые металлы, сплавы металлов, металлокерамические материалы. В табл. 29.6 ориентировочно представлены области токов, в которых применяются те или иные виды контактных материалов. В табл. 29.7—29.9 представлены специфические свойства основных

Т а б л и ц а 29.6. Применение материалов в контактах

Материал	Малоомощные контакты ($I < 5A$)	Мощные контакты ($I > 5A$)
Чистые материалы	Pt, Au, Ir, Pd, Ag, W, Cr	Cu, Ag, W, Cd
Сплавы	Ag—Au, Ag—Pt, Ag—Pd, Au—Ni, Au—Zr, Au—Ag—Pt, Pt—Ir, Pd—Ir, Pt—Ru	Ag—Cd, Cu—Pd, W—Mo
Металлокерамика	Ag—Mo, Ag—CuO	Ag—CdO, Cu—W, Ag—W, Ag—Ni, Ag—C, Ag—CuO

Т а б л и ц а 29.7. Свойства контактных материалов (металлы)

Материал	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Температура, °C			Напряжение, В				Теплота, кДж/кг	
		размягчения	плавления	кипения	размягчения	плавления	кипения	сваривания (в воздухе)	плавления	испарения
Платина	$10,5 \cdot 10^{-8}$	540	1773	4400	0,25	0,65	1,5	0,4	114	2400
Золото	$2,2 \cdot 10^{-8}$	100	1063	2973	0,08	0,43	0,9	0,43	626	1870
Индий	$5,5 \cdot 10^{-8}$	—	2450	5300	—	—	—	—	109	—
Палладий	$10,8 \cdot 10^{-8}$	—	1554	400	—	0,57	1,3	—	151	—
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$	180	960	2000	0,09	0,37	0,68	0,24	104	2320
Вольфрам	$5,5 \cdot 10^{-8}$	1000	3390	5930	0,4	1,1	2,1	1,1	192	5000
Медь	$1,75 \cdot 10^{-8}$	190	1083	2600	0,12	0,43	0,79	0,43	205	4780
Графит	$700 \cdot 10^{-8}$	—	3650	4830	2	5	—	—	—	14 000
Алюминий	$2,910 \cdot 10^{-8}$	150	658	2300	0,1	0,3	—	0,3	406	9360
Галлий	$53,4 \cdot 10^{-8}$	—	30	2227	—	—	—	—	80	4250
Кадмий	$7,5 \cdot 10^{-8}$	—	321	765	—	0,15	—	0,15	55	90
Молибден	$5,2 \cdot 10^{-8}$	900	2620	4800	0,25	0,75	1,1	—	210	6600
Никель	$8 \cdot 10^{-8}$	520	1452	2730	0,22	0,65	—	0,65	305	5830
Олово	$12 \cdot 10^{-8}$	100	232	2270	—	—	—	0,63	59	1140
Цинк	$6,1 \cdot 10^{-8}$	170	410	906	0,1	0,17	—	0,17	100	1800
Железо	$10 \cdot 10^{-8}$	500	1540	2740	0,21	0,6	—	0,35	267	6680
Хром	$20 \cdot 10^{-8}$	—	1615	2200	—	—	—	—	134	—
Ртуть	$94 \cdot 10^{-8}$	—	38,7	357	—	—	—	—	86	2350
Тантал	$14 \cdot 10^{-8}$	800	2996	4100	0,3	1,0	—	—	17,4	4180
Рутений	$7,16 \cdot 10^{-8}$	—	2500	4900	—	—	—	—	96	—
Индий	$8,2 \cdot 10^{-8}$	—	156	2097	—	—	—	—	28,4	2020
Оксид кадмия	$600 \cdot 10^{-8}$	—	—	900	—	—	—	—	—	—

Т а б л и ц а 29.8. Свойства сплавов, применяемых в контактах

Состав сплава	Содержа- ние ком- понентов, %	Плотность, кг/м³	Удельное электричес- кое сопро- тивление, Ом·м	Удельная тепл.- проводность, Вт/(м·°C)	Число Бринелля	Пределы дугообразо- вания		Коэффициент эрозии, 10 ⁻³ мм³/Кл	Температу- ра, °C	
						U, В	I, А		плавление	кипение
Серебро — медь	97/3	10 500	$1,8 \cdot 10^{-8}$	390	40	—	—	—	900	2200
То же	50/50	9 700	$2,1 \cdot 10^{-8}$	340	70	—	—	—	730	2200
Серебро — золото	90/10	11 400	$3,6 \cdot 10^{-8}$	196	23	11	0,25	1,1/15	—	—
То же	20/80	16 500	$9,4 \cdot 10^{-8}$	—	25	14	0,4	—	1035	2200
Серебро — золото — палладий	30/30/30	12 900	$22 \cdot 10^{-8}$	34	65	—	—	—	940	950
Серебро — кадмий	95/25	10 450	$2,95 \cdot 10^{-8}$	—	35	—	—	—	940	950
То же	80/20	10 100	$5,7 \cdot 10^{-8}$	—	60	10	0,3	—	875	936
Серебро — палладий	95/5	10 500	$3,8 \cdot 10^{-8}$	—	26	—	—	0,15/15	—	—
То же	40/60	11 400	$42 \cdot 10^{-8}$	220	—	—	0,5	—	1330	2200
Серебро — платина	95/5	10 880	$4,65 \cdot 10^{-8}$	30	99	—	—	—	—	—
То же	70/30	12 540	$20 \cdot 10^{-8}$	—	170	—	—	—	—	—
Золото — никель	95/5	18 240	$12,3 \cdot 10^{-8}$	—	100	15	0,38	—	990	—
Золото — палладий	99/1	19 300	$3,0 \cdot 10^{-8}$	—	20	—	—	—	—	—
То же	70/30	19 900	$34 \cdot 10^{-8}$	—	135	—	—	—	—	—
Золото — серебро — медь	70/20/10	14 300	$13 \cdot 10^{-8}$	—	114	—	—	—	—	—
Золото — платина	93/7	19 440	$10,2 \cdot 10^{-8}$	—	40	—	—	—	1060	—
Золото — серебро — никель	70/25/5	15 400	$11,8 \cdot 10^{-8}$	80	80	—	—	—	1050	2200
Золото — серебро — платина	69/25/6	16 100	$14,9 \cdot 10^{-8}$	55	112	—	—	—	1030	—
Палладий — медь	95/5	11 400	$21,6 \cdot 10^{-8}$	—	60	—	—	—	—	—
То же	60/40	10 600	$35 \cdot 10^{-8}$	38	80	0,6	0,7	—	—	—
Палладий — серебро — кобальт	60/35/5	11 100	$40,8 \cdot 10^{-8}$	—	192	—	—	—	—	—
Платина — молибден	90/10	20 500	$58,5 \cdot 10^{-8}$	—	195	—	—	—	1800	—
Платина — вольфрам	95/5	21 280	$42 \cdot 10^{-8}$	—	103	—	—	—	1850	—
Платина — никель	95/5	23 000	$20 \cdot 10^{-8}$	—	135	—	—	0,9	1700	—
Платина — родий	90/10	20 000	$19,2 \cdot 10^{-8}$	—	90	—	—	—	1840	—
Платина — иридий	95/5	21 500	$10 \cdot 10^{-8}$	42	130	20	1,1	1,0	1800	—
Вольфрам — молибден	95/5	—	$6,5 \cdot 10^{-8}$	—	280	—	—	—	3180	—
Вольфрам — родий	80/20	—	$24 \cdot 10^{-8}$	—	300	—	—	—	—	—
Медь — кадмий	91/1	8 900	$2,6 \cdot 10^{-8}$	—	345	—	—	—	—	—
Латунь	—	8 500	$7 \cdot 10^{-8}$	38	90	—	—	—	—	—
Серебро — латунь	90/10	10 100	$1,8 \cdot 10^{-8}$	—	90	—	—	—	961	2200
То же	60/40	9 500	$2,7 \cdot 10^{-8}$	310	115	—	—	—	961	2200

контактных материалов разных видов. В них указаны:

а) напряжения на контактах, при которых наступают размягчение, плавки, кипение контактов, а также их сваривание;

б) минимальные напряжения и токи, при которых образуется дуга на размыкаемых контактах;

в) коэффициент объемной эрозии (износа) контактов на 1 Кл количества электричества, протекающего через контакт в форме газового разряда.

В последнее время интенсивно исследуются и находят применение жидкометаллические контакты на основе галлия и его сплавов, основное преимущество которых — надежный

контакт без создания силы нажатия. Ряд эксплуатационных неудобств, в том числе трудности управления жидкометаллическим элементом при коммутации тока, препятствует широкому применению этих контактов.

Токоведущие части. Характерные формы поперечного сечения токоведущих частей аппарата даны на рис. 29.13. Прямоугольная (а) и круглая (б) формы применяются в аппаратах на небольшие и средние номинальные токи. Токопроводы из параллельных элементов (в) и коробчатого сечения (г) обладают развитой поверхностью охлаждения, поэтому их применяют в аппаратах на большие номинальные токи.

Тепловая мощность P , отдаваемая в окру-

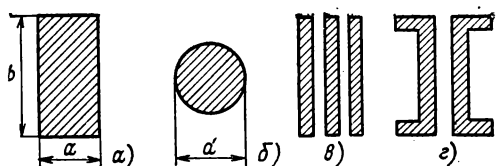


Рис. 29.13. Характерные формы поперечного сечения токоведущих частей

жающую среду с поверхности S_3 нагретого тела, определяется по формуле Ньютона:

$$P = K_T S_3 \tau,$$

где τ — превышение температуры нагретого элемента над температурой окружающей среды ($\tau = T - T_{\text{окр}}$).

Коэффициент теплопередачи K_T , Вт/(м²·°C), определяется по формуле

$$K_T = 1,33 \frac{(T - T_{\text{окр}})^{1/4}}{l^{1/4}} + 2,04 \cdot 10^{-7} \times \\ \times T_{\text{окр}}^3 \varepsilon \left(\frac{2,03T}{T_{\text{окр}}} - 1 \right).$$

Здесь температура элемента T и температура окружающей среды воздуха $T_{\text{окр}}$ измеряются в кельвинах, определяющий размер l — в метрах; обычно это размер проводника в направлении наиболее интенсивного отвода тепла (для горизонтальных круглых проводников — диаметр проводника, для горизонтальных прямоугольных шин — высота шины и т.д.). Коэффициент теплового излучения ε равен:

Алюминиевые проводники	0,05—0,07
Медь окисленная	0,5—0,78
Латунь	0,06—0,22
Сталь окисленная	0,7—0,82
Сталь оцинкованная	0,22—0,27
Чугун	0,25—0,81

Ориентировочные значения K_T , Вт/(м²·°C), лежат в следующих пределах:

Горизонтальные плоские медные шины	6—9
Круглые медные стержни	9—13
Стальные поверхности	10—14

Коэффициенты теплоотдачи K_T , Вт/(м²·°C),

для различных элементов электрических аппаратов

Спиральные при вертикальном расположении	20
Трубчатые эмалированные вертикальные	21
Рамочные элементы	10
Чугунные элементы	12
Корпуса маслonaполненных аппаратов	16
Элементы, покрытые лаком	14
Стальные элементы в воздухе	11
То же в масле	80

Если ток в проводнике I , коэффициент теплопередачи K_T и теплофизические константы материала проводника остаются постоянными, то изменение превышения температуры проводника над температурой окружающей среды:

а) при нагреве

$$\tau = \tau_y [1 - \exp(-t/\theta)] + \tau_n \exp(-t/\theta),$$

где τ_y — установившееся превышение температуры; τ_n — начальное превышение температуры проводника.

Установившееся превышение температуры

$$\tau_y = I^2 \rho_0 / K_T p S.$$

Тепловая постоянная времени нагрева, с,

$$\theta = S \gamma c / K_T p.$$

В этих выражениях ρ_0 — удельное сопротивление материала проводника, Ом; p — периметр поперечного сечения проводника, м; c — удельная теплоемкость материала проводника, Дж/кг; S — площадь поперечного сечения про-

Т а б л и ц а 29.9. Свойства металлокерамических материалов

Состав материала	Содержание компонентов, %	Плотность, кг/м ³	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Удельная теплопроводность, Вт/(м·°C)	Пределы дугообразования		Температура, °C	
					U, В	I, А	плавления	кипения
Медь — графит	95/5	6 500	4,3·10 ⁻⁸	—	—	—	—	—
Медь — вольфрам	80/20	9 860	2,4·10 ⁻⁸	310	—	—	—	—
То же	40/60	13 500	4,3·10 ⁻⁸	168	—	—	—	—
Серебро — графит	99/1	10 000	2·10 ⁻⁸	360	—	—	—	—
То же	97/3	9 300	2,6·10 ⁻⁸	—	—	—	—	—
Серебро — молибден	90/10	10 400	2·10 ⁻⁸	240	—	—	—	—
То же	30/70	10 280	3,6·10 ⁻⁸	228	—	—	960	2200
Серебро — вольфрам	80/20	11 500	1,8·10 ⁻⁸	320	16	0,17	961	2200
То же	50/50	13 600	2,8·10 ⁻⁸	280	—	—	—	—
Серебро — никель	90/10	10 100	1,8·10 ⁻⁸	—	—	—	—	—
То же	60/40	9 500	3,5·10 ⁻⁸	310	11	0,15	—	—
Серебро — карбид вольфрама	70/30	12 500	3·10 ⁻⁸	—	18	0,21	960	2200
Серебро — окись меди	90/10	9 500	2,5·10 ⁻⁸	350	—	—	—	—
Серебро — окись кадмия	95/5	10 250	1,9·10 ⁻⁸	380	—	—	961	1390
То же	85/15	9 700	3,0·10 ⁻⁸	325	12	0,18	962	1390
Серебро — окись хрома	98/2	9 900	2,8·10 ⁻⁸	—	—	—	980	2200
Серебро — кремний	98/5/1,5	10 400	2,1·10 ⁻⁸	—	—	—	—	—

водника, м^2 ; γ — плотность материала проводника, кг/м^3 ;

б) при охлаждении

$$\tau = \tau_n \exp(-t/\theta).$$

Обозначения — аналогичные приведенным выше. Последняя формула справедлива, если в процессе охлаждения проводника по нему не проходит ток.

Расчет контактов и токоведущих частей в номинальном режиме

Контакты. Обычно при расчете требуется определить силу контактного нажатия, при которой температура нагрева места контактирования (контактной точки) не превысит допустимую.

В режиме длительного протекания тока контакты рассчитываются из условия, чтобы выделяемая в них тепловая мощность в совокупности с условиями теплоотдачи создавала нагрев, при котором температура контактной точки не превышала бы допустимую (75—125 °С), которая в пределе не была бы больше температуры кристаллизации T_p контактного материала:

Материал	$\sigma_{\text{см}}$, МПа	T_p , °С
Серебро	303	150
Медь	500	190
Никель	2200	520
Вольфрам	2930	1000

Переходное сопротивление контакта $R_{\text{п}}$, Ом, определяющее в совокупности с током выделяемую в контакте тепловую мощность ($P_{\text{п}} = R_{\text{п}} I^2$), можно найти по одной из следующих формул:

а) теоретическая

$$R_{\text{п}} = \frac{\rho_0}{2} \sqrt{\frac{\pi \sigma_{\text{см}}}{n P_{\text{к}}}},$$

где ρ_0 — удельное сопротивление контактного материала, Ом·м; $\sigma_{\text{см}}$ — сопротивление контактного материала смятию (табл. 29.10); n — число контактных точек (для неблагоприятных условий: точечный контакт $n=1$, линейный $n=2$, плоскостной $n=3$);

б) эмпирическая

$$R_{\text{п}} = \frac{K_1}{\sqrt{P_{\text{к}}}} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha T \right),$$

где T — температура контактной точки, °С; α — температурный коэффициент сопротивления, °С⁻¹.

В обе формулы входит сила нажатия в контактах $P_{\text{к}}$, которая является основным параметром, определяемым при расчете контактов. Значения коэффициента K_1 для некоторых материалов и типов контактов приведены в табл. 29.10.

Для ряда контактных материалов при контактном нажатии до 300 Н переходное сопротивление контактов может быть найдено по опытным зависимостям рис. 29.14.

Удельное переходное сопротивление некоторых жидкометаллических контактов в паре с твердыми металлами можно найти по табл. 29.11.

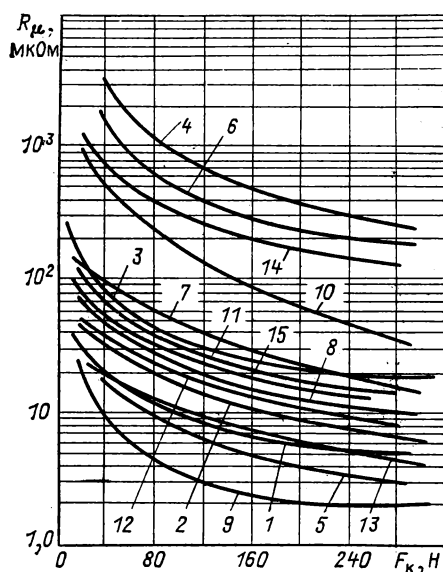


Рис. 29.14. Зависимости сопротивления контактов от силы нажатия для разных контактных материалов:

1 — серебро; 2 — медь; 3 — латунь; 4 — сталь; 5 — Ag + Cr; 6 — графит; 7 — Ag + Ni; 8 — Ag + Cu (15 %); 9 — Ag + 20 % Cu; 10 — Ag + 12 % C; 11 — Cu + 5 % C; 12 — Ag + 40 % Cu; 13 — Ag + 12 % CdO; 14 — W + Ag + Ni; 15 — Ag + 15 % CdO.

Таблица 29.10. Значения коэффициента K_1

Материал	K_1	Материал	K_1
Al—Al	0,01—0,02	Латунь — медь	0,0012
Al — латунь	0,006	Медь луженая — медь	0,0013
Al — сталь	0,003	Медь луженая — медь луженая	0,0003
Сталь — сталь	0,014	Серебро — серебро	0,00019
Латунь — латунь	0,024	Олово — олово	0,0015
Латунь — железо	0,0021		
	0,001		

Таблица 29.11. Удельные переходные сопротивления жидкометаллических контактов

Контактная пара	$R_{\text{ж}}^0$, Ом·м ²
Ртуть — медь	$2 \cdot 10^{-9}$
Ртуть — никель	$6 \cdot 10^{-10}$
Ртуть — сталь	10^{-10}
Галлий — медь	$6 \cdot 10^{-8}$
Галлий — сталь	$3 \cdot 10^{-6}$
Галлий — никель	10^{-10}
Сталь — сплав 62 % Ga, 25 % In и 13 % Sn	$75 \cdot 10^{-10}$
Никель — сплав 62 % Ga, 25 % In и 13 % Sn	$43,2 \cdot 10^{-10}$
Хром — сплав 62 % Ga, 25 % In и 13 % Sn	$81,1 \cdot 10^{-10}$

Для приближенного определения температуры нагрева контактной точки с учетом влияния геометрических размеров токоподводящих элементов пригодна формула

$$T = T_{\text{окр}} + \frac{\rho_0 I^2}{p S K_T} + \frac{R_{\text{п}} I^2}{2 \sqrt{\lambda S K_T}},$$

где $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды; I — ток, протекающий через контакт, А; λ и ρ_0 — коэффициент теплопроводности материала контакта, Вт/(м·°С), и его удельное сопротивление, Ом·м; p и S — периметр и площадь поперечного сечения токоведущей части, на которой расположен контакт, м²; K_T — коэффициент теплопередачи с поверхности токоведущей части, Вт/(м²·°С).

Если не учитывать влияние токоведущих частей на отвод тепла от контактной точки, из этой формулы надо исключить третий член.

При заданных токе I , типе и материале контактов, их допустимой температуре T по этой формуле определяется переходное сопротивление $R_{\text{п}}$. По найденному $R_{\text{п}}$ и одной из предыдущих формул (или зависимостей) определяется сила нажатия на контактах.

Токоведущие части. При длительном протекании тока I по проводнику в установившемся состоянии связь между периметром p и площадью S поперечного сечения проводника, удельным сопротивлением ρ материала проводника, температурой нагрева T проводника и температурой $T_{\text{окр}}$ окружающей среды определяется зависимостью

$$pS = \rho I^2 (1 + \alpha T) / K_T (T - T_{\text{окр}}),$$

где α и K_T — температурный коэффициент сопротивления материала проводника и коэффициент теплопередачи.

Для проводника прямоугольного поперечного сечения со сторонами a и b

$$ab(a + b) = \rho I^2 (1 + \alpha T) / 2 K_T (T - T_{\text{окр}}).$$

Для круглого проводника диаметром d

$$d = \sqrt{\rho I^2 (1 + \alpha T) / \pi^2 K_T (T - T_{\text{окр}})}.$$

С учетом поверхностного эффекта и эффекта близости удельное сопротивление материала проводника

$$\rho = \rho_0 K_{\text{пз}} K_{\text{бл}},$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при постоянном токе.

Зависимости коэффициента поверхностного эффекта $K_{\text{пз}}$ от соотношений размеров a и b поперечного сечения прямоугольных шин даны на рис. 29.15. По оси абсцисс отложен параметр

$$X_0 = 1,6 \cdot 10^{-3} \sqrt{f S / \rho_0},$$

где f — частота тока, Гц; $S = ab$ — поперечное сечение, м²; ρ_0 — удельное сопротивление материала, Ом·м. Значения коэффициентов близости $K_{\text{бл}}$ приведены в табл. 29.12.

Допустимая температура нагрева токоведущих частей аппаратов обычно определяется классом изоляции, с которой они соприкасаются.

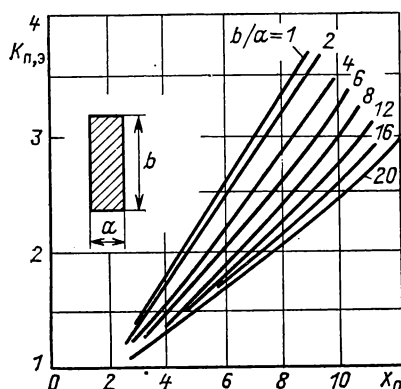


Рис. 29.15. Коэффициент поверхностного эффекта для проводников прямоугольного сечения

Допустимые температуры нагрева токоведущих элементов контакторов при нагрузке номинальным током и напряжении на втягивающей катушке не выше 105 % номинального для разных классов изоляции составляют 95—155 °С.

Таблица 29.12. Коэффициент близости $K_{\text{бл}}$ для двух параллельных проводников круглого сечения для различных l/d и $K_x = \sqrt{f/R_{100}}$

K_x	l/d				
	1,03	1,27	1,68	2,0	6,5
100	1,15	1,06	1,03	1,02	1,005
200	1,46	1,38	1,13	1,08	1,01
300	1,7	1,55	1,16	1,09	1,02
400	1,93	—	1,18	1,1	1,03
500	2,1	—	1,2	1,12	1,04
600	2,23	—	1,21	1,13	1,05

Примечание: l — расстояние между осями проводников, м; d — диаметр проводников, м; f — частота, Гц; R_{100} — сопротивление проводников длиной 100 м·Ом.

Расчет контактов и токоведущих частей в режиме протекания сверхтока

Контакты. В режиме кратковременного протекания тока короткого замыкания контакты не должны самопроизвольно расходиться под действием электродинамических сил и не должны привариваться. Электродинамическая сила, Н, отталкивания контактов при токе I равна:

$$P_{\text{аду}} = 2 \cdot 10^{-7} I^2 \ln(S/S_{\text{см}}),$$

где S — поперечное сечение токоведущего стержня, подводящего ток к контактной точке, м².

Сечение площадки смятия в контакте

$$S_{\text{см}} = P_{\text{к}} / \sigma_{\text{см}},$$

где $P_{\text{к}}$ — сила нажатия в контактах, создаваемая контактной пружиной, Н; $\sigma_{\text{см}}$ — сопро-

тивление контактного материала смятию, Па (см. табл. 29.10).

Ток сваривания контактов $I_{св}$ выражается следующей эмпирической зависимостью от определяющих факторов:

$$I_{св} = 2 \sqrt{\frac{\pi^{1/2} \lambda P_K (T_{пл} - T_0)}{0,7 \rho \sigma_{см}}} \times \exp \left(\frac{0,8c\gamma}{\lambda} \sqrt{\frac{P_K}{\pi \sigma_{см} t}} \right),$$

где ρ , $\sigma_{см}$, c , γ , λ , $T_{пл}$ — удельное электрическое сопротивление, сопротивление смятию, удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и температура плавления материала контакта; P_K — сила нажатия в контактах; t — время протекания приваривающего тока; T_0 — начальная температура контакта.

Существует другая зависимость для тока сваривания, позволяющая определить его по известному напряжению сваривания $U_{св}$ (см. табл. 29.7):

$$I_{св} = \frac{2U_{св}}{\rho} \sqrt{\frac{nP_K}{\pi \sigma_{см}}},$$

где n — число площадок касания в контакте (см. выше).

Сила контактной пружины окончательно выбирается такой, чтобы она была выше силы контактного нажатия, рассчитанной для номинального режима, выше электродинамической силы, вызывающей самопроизвольное расхождение контактов, и больше той силы, при которой возможно приваривание контактов при токе короткого замыкания (или другом сверхтоке).

Конструктивные схемы нескольких типов компенсаторов электродинамических сил, предотвращающих самопроизвольное размыкание контактов при сверхтоках благодаря созданию встречно направленных сил по отношению к электродинамическим силам отталкивания контактов, даны на рис. 29.16.

На рис. 29.16, а использован принцип деления цепи тока на несколько параллельных ветвей, на рис. 29.16, б компенсирующее усилие возникает за счет «петли» тока, в варианте рис. 29.16, в использован принцип компенсации за счет электромагнитной силы и в варианте рис. 29.16, г используется «двойная петля тока», когда силы взаимодействия между деталями 1—3 и 2—3 направлены противоположно электродинамическим силам отталкивания в контактах.

Токоведущие части. В кратковременном режиме протекания по проводнику тока (например, тока короткого замыкания), когда можно пренебречь отдачей тепла в окружающую среду, связь между током I , площадью поперечного сечения проводника S , временем протекания тока t_k , температурой нагрева проводника T_K определяется формулой

$$J_K = \frac{I_K}{S} = \sqrt{\frac{\gamma_c}{\alpha \rho_0 K_{пл,э} K_{бл} t_K} \ln \frac{1 + \alpha T_K}{1 + \alpha T_H}},$$

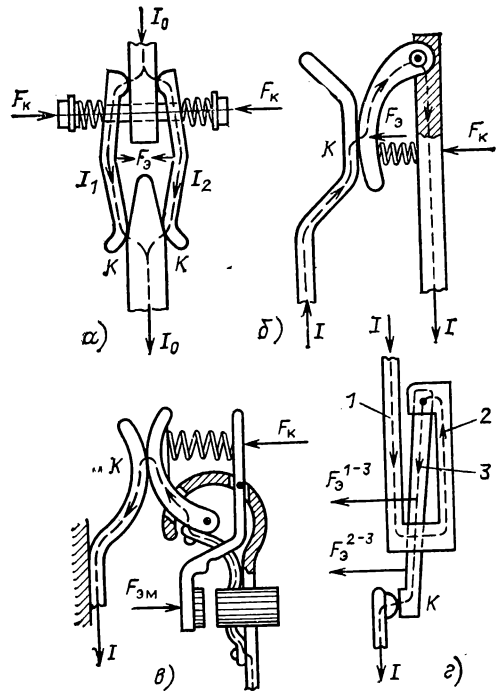


Рис. 29.16. Разновидности компенсаторов электродинамических сил:

а — деление цепи тока на параллельные ветви; б — «одинарная петля тока»; в — электромагнитный; г — «двойная петля тока»

где J — плотность тока в кратковременном режиме; γ , c , ρ_0 и α — плотность, удельная теплоемкость, удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления материала; T_H — начальная температура нагрева; $K_{пл,э}$ и $K_{бл}$ — коэффициенты поверхностного эффекта и эффекта близости. Единицы величин: I — А; S — мм²; t_k — с; $T_K < T_H$ — °С; γ — кг/м³; c — Дж/(кг·°С); ρ_0 — Ом·м; α — °С⁻¹.

Расчет по последней зависимости при токах короткого замыкания называется расчетом на термическую стойкость. Наиболее распространенные интервалы времени для определения термической стойкости $t_k = 1$ или 5, или 10 с. Допустимые температуры T_K указаны в табл. 29.13.

Для двух разных токов термической стойкости I'_K и I''_K и соответствующих им времен

Т а б л и ц а 29.13. Допустимые температуры нагрева токоведущих частей в режиме короткого замыкания

Токоведущие части	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь
Неизолированные токоведущие части	300	300	200	400
Изолированные части с изоляцией класса:	200	200	200	200
А	250	250	200	250
В и С	300	300	200	400

термической стойкости t'_k и t''_k справедливо соотношение

$$I'_k/I''_k = \sqrt{t'_k/t''_k}$$

Электродинамическая сила взаимодействия двух параллельных круглых проводников с одинаковыми токами

$$P_{\text{эду}} \approx 10^{-7} I^2 \frac{2l}{a} \left(\sqrt{\frac{l^2 + a^2}{l^2}} - \frac{a}{l} \right),$$

где l — длина проводника; a — расстояние между ними.

Электрический износ контактов

Слаботочные контакты. Обычную эрозию (износ) $\Delta V_{\text{эп}}$ контактного материала на единицу количества электричества (1 Кл), протекающего через контакты в форме газового разряда, можно оценить по коэффициентам эрозии $k_{\text{эп}}$, представленным в табл. 29.8:

$$\Delta V_{\text{эп}} = k_{\text{эп}} q_0 N,$$

где q_0 — количество электричества, Кл, протекающего через контакты в форме газового разряда за одно отключение цепи с током I_0 ; N — число отключений цепи.

При линейном характере спада тока к нулю при отключении

$$q_0 \approx I_0 t_d / 2,$$

где I_0 — начальное значение отключаемого тока, А; t_d — время дуги (искры), с.

Коэффициенты эрозии $k_{\text{эп}}$ (10^{-3} мм³/Кл) приблизительно равны для некоторых контактных материалов:

Материал	При отключении тока	При включении тока
Платина	1,2	—
Золото	1,1	18,0
Серебро	0,2—0,4	6—18
Вольфрам	0,04	4,0
Медь	1	6
Графит	6	0,8
Цинк	5,4	6
Железо	2	4

Объем $\Delta V_{\text{эп}}$, мм³, мостиковой эрозии (переноса) в контактах из одинаковых материалов за N отключений цепи с током I_0 , А, оценивается по формуле

$$\Delta V_{\text{эп}} = k_{\text{м.э}} I_0^3 N,$$

где коэффициент мостиковой эрозии $k_{\text{м.э}}$ равен:

Золото	4,42·10 ⁻¹¹
Платина	5,63·10 ⁻¹¹
Серебро	6,76·10 ⁻¹¹
Палладий	5,32·10 ⁻¹¹

Имеются контактные пары из разных металлов, в которых наблюдается самоограничивающий мостиковый перенос материала:

Катод	Pt	Pd	Pt	Pd
Анод	Ag	Ag	Au	Au

Продолжение

Катод	Pt—Ir (10)	Pt—Ir (10)	Au—Ni (5)
Анод	Ag	Au	Ag

Сильноточные контакты. Износ массы ΔQ , кг, контактов пускателей и контакторов при отключении цепи с током I_0 , А, оценивается по формуле

$$\Delta Q = 10^{-9} k_{\text{н}} N I_0^2.$$

Эмпирический коэффициент $k_{\text{н}}$, 10^{-6} кг/м², примерно равен:

Контакты со сниженной вибрацией (меньше 0,3 мс):	
Серебро	1—3
Серебро — окись кадмия	1—2
Контакты со значительной вибрацией (от 1 до 5 мс):	
Серебро — окись кадмия, серебро—никель	15—150
Серебро	50
Медь	200

Степень влияния напряженности H поля магнитного дутья на линейный износ контактов при разных токах иллюстрируется зависимостями рис. 29.17. Оптимальная напряжен-

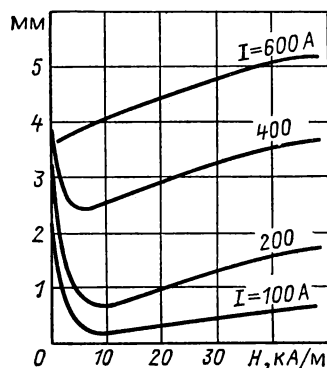


Рис. 29.17. Линейный износ медных контактов при разных токах в зависимости от напряженности магнитного поля

ность, соответствующая минимальному износу, равна: 10,5 кА/м при токе 100 А; 8 кА/м при 200 А; 4,8 кА/м при 400 А; 0 при 600 А.

Для приближенной оценки удельной объемной эрозии распространенных контактных материалов на 1 Кл количества электричества, протекавшего через контакты из одинаковых материалов в форме дугового разряда, рекомендуются данные табл. 29.14.

Таблица 29.14. Удельная объемная эрозия $\Delta V_{\text{уд}}$, 10^{-3} мм³/Кл, контактов в разных диапазонах отключаемого тока

Материал	Отключаемый ток, кА				
	4—2	5—8	15—20	20—30	40—50
Серебро	0,3	1,25	1,8	1,9	1,9
Сплав Cu—Ag	0,2	1,0	1,5	1,5	1,5
Медь	0,1	0,6	1,5	1,5	1,5
Вольфрам	0,05	0,1	0,2	0,6	0,6
40 % Cu+60 % W	0,05	0,1	0,25	0,3	0,5
20 % Ag+80 % W	0,06	0,1	0,2	0,3	0,5
10 % Cu+90 % W	0,05	0,06	0,02	0,02	0,3

Эквивалентные продолжительные токи

При повторно-кратковременном и кратковременном режимах работы аппарата периоды нагрузки током чередуются с паузами, когда ток по токоведущим частям не проходит. Расчет токоведущих частей в этих условиях производится по приведенным выше формулам, относящимся к режиму продолжительного протекания тока, с той только разницей, что в них вместо тока I подставляется значение эквивалентного тока, вычисляемого в соответствии с режимом работы. Под эквивалентным током $I_{\text{экв}}$ понимается неизменный ток, который, длительно протекая по проводнику, нагревает его до такой же температуры, что и реальный ток, изменяющийся во времени в соответствии с режимом работы.

Для повторно-кратковременного режима

$$I_{\text{экв}} = I_{\text{н}} \sqrt{\frac{1 - \exp(-t_{\text{н}}/\theta)}{1 - \exp(-t/100\%/\theta \text{ ПВ } \%)}}$$

где $I_{\text{н}}$ — ток нагрузки в интервалы времени нагрузки; θ — постоянная времени нагрева, вычисляемая по вышеприведенной формуле.

Относительная продолжительность включения в процентах

$$\text{ПВ } \% = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{н}} + t_{\text{п}}} 100,$$

где $t_{\text{п}}$ — продолжительность бестоковой паузы.

Максимальная температура нагрева проводника в повторно-кратковременном режиме

$$T_{\text{max}} = T_{\text{окр}} + \tau_y \frac{1 - \exp(-t_{\text{н}}/\theta)}{1 - \exp(-t_{\text{н}}/100\%/\theta \text{ ПВ } \%)},$$

где τ_y определяется по вышеприведенной формуле. Для кратковременного режима

$$I_{\text{экв}} = I_{\text{н}} \sqrt{1 - \exp(-t_{\text{н}}/\theta)};$$

$$T_{\text{max}} = T_{\text{окр}} + \tau_y [1 - \exp(-t_{\text{н}}/\theta)].$$

29.4. ДУГОГАСИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Общие сведения

Коммутирующие устройства контактных аппаратов исполняются на базе контактных систем по рис. 29.12. При токах до нескольких десятков ампер никаких дугогасительных устройств обычно не применяется: на контактах возникает свободная дуга или искра, которая гаснет в атмосфере окружающей газовой среды. При больших токах применяются дугогасительные устройства, в которые загоняется электрическая дуга; за счет растяжения и интенсивного охлаждения в них электрическое сопротивление дуги быстро возрастает, обеспечивая разрыв цепи тока.

На рис. 29.18 изображены основные разновидности дугогасительных камер низкого напряжения: *а* — щелевая камера с одной щелью; *б* — щелевая с несколькими параллельными щелями; *в* — щелевая лабиринтная с удлиняющейся дугой по мере ее вхождения в камеру; *г* — дугогасительная решетка из металлических (обычно стальных) пластин.

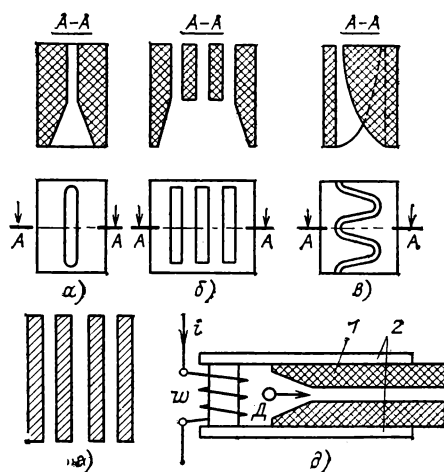


Рис. 29.18. Характерные типы дугогасительных камер низкого напряжения

Щелевые камеры изготавливаются из дугостойкого изоляционного материала (асбестоцемент, керамика, пластмассы); в их внутренние полости загоняется дуга и гасится за счет интенсивного охлаждения стенками и растяжения. Дугогасительная решетка набрана из стальных пластин, которые и разбивают входящую на них дугу на ряд коротких дуг. Рост сопротивления столба дуги и ее гашение обеспечиваются интенсивным охлаждением столба пластинами. Существуют комбинированные камеры, сочетающие в себе принципы построения указанных устройств.

На рис. 29.18, *г* дана схема системы магнитного дутья. Протекающий через обмотку w ток i создает магнитное поле, которое с помощью стальных пластин 2 подводится к зоне горения дуги D . Сила взаимодействия тока дуги с этим полем загоняет дугу в щелевую камеру I .

При конструировании аппаратов на напряжение до 1000 В необходимо учитывать требования техники безопасности [29.19, 29.20]. Стандарты содержат указания о заземлении оснований аппаратов, фиксации рабочего положения, выборе изоляционных расстояний, предупреждений травмирования руки оператора при отбросе рукоятки привода, об ограничении опасной зоны выхлопа и др.

Зависимости для расчета дугогасительных устройств постоянного тока

Дугогасительные устройства (ДУ) постоянного тока рассчитываются на основе условия гашения дуги постоянного тока: вольтамперная характеристика ДУ должна лежать выше реостатной характеристики отключаемой цепи или в пределе касаться ее в одной точке. На рис. 29.19 изображены два варианта расчета:

а) Задана вольтамперная характеристика ДУ $U_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$. Методом построения касательной к ней определяется наибольший отключаемый ток $I_{\text{з}}$ при заданном напряжении источ-

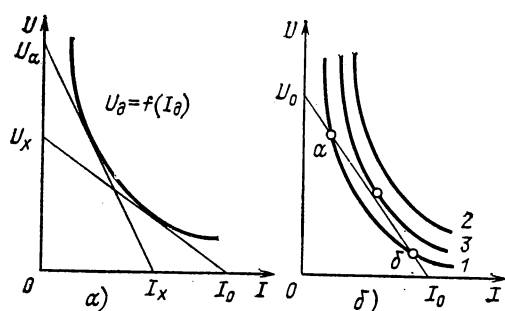


Рис. 29.19. Варианты расчета дугогасительных устройств постоянного тока

ника U_0 или наибольшее напряжение источника U_x при заданном отключаемом токе I_0 (рис. 29.19, а).

б) Задана характеристика отключаемой цепи — прямая, соединяющая на графике две точки на осях координат (U_0 — заданное напряжение источника питания и I_0 — заданный отключаемый ток). Расчетом подбирается вольт-амперная характеристика ДУ, удовлетворяющая условию гашения дуги (на рис. 29.19, б характеристика 1 не удовлетворяет этому условию, характеристика 2 создает излишний запас в дугогасительной способности ДУ, характеристика 3 соответствует оптимальным условиям).

Статическая вольт-амперная характеристика свободной дуги в газе при токах до 10 А выражается эмпирической зависимостью

$$U_d = C I_d^{-n} (10^{-5})^m I_d,$$

где I_d — ток дуги; l_d — длина дуги, м; p — давление газа, Па.

Постоянные C , n и m указаны в табл. 29.15.

Таблица 29.15. Постоянные C , n и m

Газ	C	n	m
Водород	40 000	0,7	0,32
Углекислый газ	10 000	—	—
Воздух	9200	0,5	0,31
Азот	9000	0,6	0,31
Аргон	3500	0,53	0,16
Гелий	18 000	0,72	0,2

Используя эту формулу для $U_d = f(I_d)$ и выражая реостатную характеристику цепи в виде

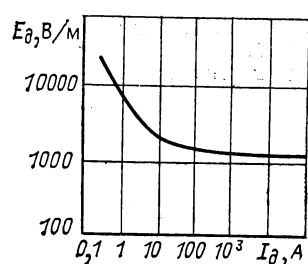
$$U_p = U_0 (1 - I/I_0),$$

на основе условия гашения дуги можно получить следующую формулу для критической длины дуги:

$$l_{кр} = \frac{n^n}{(n+1)^{n+1}} \frac{U_0 I_0^n}{C (10^{-5} p)^m}.$$

Эта зависимость справедлива при небольших отключаемых токах.

Рис. 29.20. Статическая вольт-амперная характеристика дуги в воздухе



Вольт-амперная характеристика открытой дуги в воздухе, перемещающейся со скоростью v , м/с:

$$U_d = I_d \frac{9200 + 9,2 v_d}{\sqrt{I_d}},$$

где U_d — В; I_d — м; v_d — м/с; I_d — А.

Зависимость градиента напряжения E_d свободной дуги при больших токах по опытным данным разных авторов представлена на рис. 29.20.

Скорость движения дуги на рычажных контактах при токе до 200 А:

$$v_d = 0,02 I_d \beta_k^{-1/2},$$

где β_k — расстояние между контактами, м.

Скорость дуги в поперечном магнитном поле напряженностью H , А/м, равна:

$$v_d = 0,019 \sqrt[3]{\frac{I_d H^2}{(1 + 0,1 H^{0,3})^2}}.$$

Вольт-амперная характеристика дуги в камере с узкой щелью, когда диаметр дугового столба в сечении превышает ширину щели:

$$U_d = I_d \left(\frac{9200}{\sqrt{I_d}} + \frac{1,45 \sqrt{I_d}}{\delta_{щ}^{2/3}} + 0,07 \sqrt[3]{\frac{v_d^2 I_d}{\delta_{щ}^2}} \right).$$

Когда диаметр дуги меньше ширины щели (широкая щель),

$$U_d = I_d \left(\frac{9200}{\sqrt{I_d}} + \frac{1,45 \sqrt{I_d}}{\delta_{щ}^{2/3}} + 800 \sqrt[3]{\frac{v_d^2}{I_d}} \right).$$

В этих выражениях: U_d — напряжение дуги, В; l_d — длина столба дуги, м; I_d — ток дуги, А; $\delta_{щ}$ — ширина щели камеры, м; v_d — скорость дуги в камере, м/с.

Диаметр столба дуги, м, приближенно оценивается по формуле

$$d \approx 1,12 \cdot 10^{-2} \sqrt{I_d / (0,2 + v_d)}.$$

Напряжение дуги в дугогасительной решетке, состоящей из n стальных пластин, при расстоянии δ_n , м, между ними равно:

$$U_d = (110 + 0,003 I_d) (0,7 + 4,0 \delta_n) \sqrt[n]{n-0,6}.$$

Скорость дуги в решетке, м/с, при токах от 100 до 3000 А определяется по эмпирической формуле:

$$v_d \approx 1730 \delta_n^2 I_d^{-1/3}.$$

Зависимости для расчета дугогасительных устройств переменного тока

Расчет дугогасительных устройств (ДУ) переменного тока проводится на основе условия гашения дуги переменного тока: за переходом тока через нулевое значение восстанавливающаяся прочность $u_{в,п}$ в любой момент времени должна быть выше восстанавливающегося напряжения $u_{в}$ (рис. 29.21).

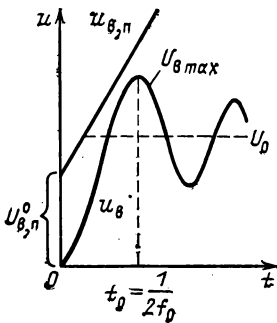


Рис. 29.21. Условия гашения электрической дуги переменного тока

Для неблагоприятных условий при первом подъеме восстанавливающегося напряжения $u_{в}$, продолжающемся на отрезке времени от 0 до t_0 , восстанавливающееся напряжение можно оценить по формуле

$$u_{в} \approx \left(\frac{du_{в}}{dt} \right)_{cp} t,$$

где средняя скорость восстановления напряжения равна:

$$\left(\frac{du_{в}}{dt} \right)_{cp} = 2K_a f_0 U_0.$$

Коэффициент амплитуды восстанавливающегося напряжения K_a , равный отношению амплитуды первого пика этого напряжения $U_{в max}$ к напряжению источника в момент перехода тока через нуль (возвращающееся напряжение) U_0 , для свободной дуги в воздухе

$$K_a = 1 + \exp(-0,0003 f_0).$$

Собственная частота f_0 , Гц, восстанавливающегося напряжения при отключаемых токах до 10 кА для типичных промышленных сетей равна:

$$f_0 = (2 \div 2,6) \cdot 10^6 I_0^{0,2} U_{ном}^{-0,8},$$

где I_0 — отключаемый ток, А; $U_{ном}$ — напряжение источника (действующее значение), В.

При номинальном напряжении сети $U_{ном}$ и угле сдвига фаз между током и напряжением φ возвращающееся напряжение

$$U_{в} = \sqrt{2} U_{ном} \frac{K_{сх}}{\sqrt{3}} \sin \varphi.$$

Коэффициент схемы $K_{сх}$ равен:

При отключении трехфазной цепи трехполюсным аппаратом	1,5
При отключении однофазной цепи на линейном напряжении:	
однополюсным аппаратом	1,73
двухполюсным аппаратом	0,865

Восстанавливающаяся прочность в ДУ аппаратов управления выражается эмпирической зависимостью от времени t :

$$n_{вп} \approx U_{вп}^0 + K_{\Sigma} t.$$

Для ДУ с открытым разрывом в воздухе на рис. 29.22 даны опытные зависимости от

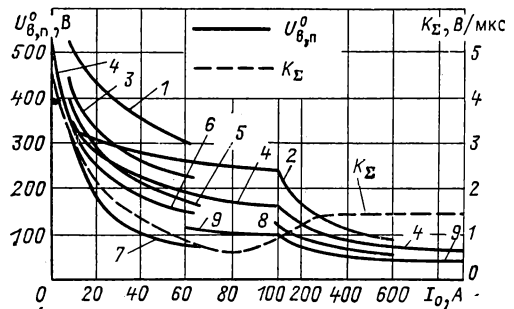


Рис. 29.22. Опытные зависимости скорости роста прочности K_{Σ} и начальной восстанавливающейся прочности $U_{в,п}^0$ от тока для разных контактных материалов (свободная дуга в воздухе):

1 — серебро; 2 — латунь; 3 — серебро — никель; 4 — медь; 5 — серебро — вольфрам; 6 — серебро — окись кадмия; 7 — серебро — графит; 8 — алюминий; 9 — сталь (позиции 3, 5, 6, 7 — металлокерамика)

тока скорости роста восстанавливающейся прочности K_{Σ} и для ряда контактных материалов — начальной восстанавливающейся прочности $U_{в,п}^0$. Эти кривые относятся к одному разрыву отключающего аппарата.

Для дугогасительной решетки, имеющей n разрывов на металлических (стальных) пластинах, $U_{в,п}^0$, В и K_{Σ} , В/мкс, определяют по эмпирическим формулам:

$$U_{в,п}^0 \approx 72 (1 + \delta_n) \sqrt{n - 0,6};$$

$$K_{\Sigma} \approx \frac{3,2 \cdot 10^7 [8,2 \cdot 10^{-4} + \delta_n^2 (\sqrt{I_0} - 2 \sqrt{I} (40 + \frac{-5,7}{+ \sqrt{T_n}}) \sqrt{\Delta (n - 0,6)})]}{2 \sqrt{I} (40 + \frac{-5,7}{+ \sqrt{T_n}}) \sqrt{\Delta (n - 0,6)}},$$

где I_0 — отключаемый ток, А; δ_n — расстояние между пластинами, м; Δ — толщина пластин, м.

Температура нагрева пластин решетки, °С:

$$T_n = 20 + 0,018 I_0 \sqrt{z},$$

где z — число отключений цепи в час.

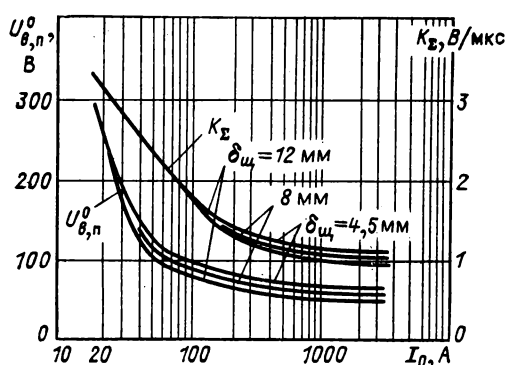


Рис. 29.23. Зависимости K_{Σ} и $U_{в,п}^0$ от тока для щелевых камер

Зависимости $U_{в,п}^0$ и K_{Σ} для щелевых дугогасительных камер при разной ширине щели $\delta_{щ}$ приведены на рис. 29.23.

Наружная поверхность охлаждения дугогасительной камеры, m^2 , рассчитывается по формуле

$$S_H = \frac{z W_D^0}{3600 K_T (T_D - T_{окр})},$$

где K_T — коэффициент теплоотдачи, около $15 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$; T_D — допустимая температура нагрева стенок; $T_{окр}$ — температура окружающей среды; z — число отключений в час.

Энергия, выделенная при гашении дуги, W_D^0 при одном цикле отключения цепи постоянного тока с индуктивностью L , током I_0 , напряжением U_0 при времени дуги t_d равна:

$$W_D^0 = (U_0 I_0 t_d / 6) + L I_0^2 / 2.$$

Гибридные и синхронные коммутирующие устройства

Гибридные устройства сочетают в себе параллельно включенные контактную систему (проводит ток во включенном состоянии аппарата) и полупроводниковую приставку (осуществляются практически бездуговые отключение цепи с током и его включение). На контактах аппарата существует лишь кратковременная дуга в процессе перехода тока из одной параллельной ветви в другую, поэтому электрическая износостойкость аппарата равна его механической износостойкости.

На рис. 29.24 дана схема гибридного контактора переменного тока, выполненного на основе бездугового контактора серий МК2 и МК3. В моменты отскока контакта при включении и размыкании главного контакта ГК, при отключении контактора тиристоры VS1, VS2, включаясь, шунтируют ГК, исключая образование дуги. Управление тиристорами осуществляется за счет падения напряжения на контактном переходе ГК, возникающего при его размыкании и прикладываемого к цепям управления тиристоров через разделительные диоды VD2, VD3. В зависимости от полярности полуволны тока сигнал управления пода-

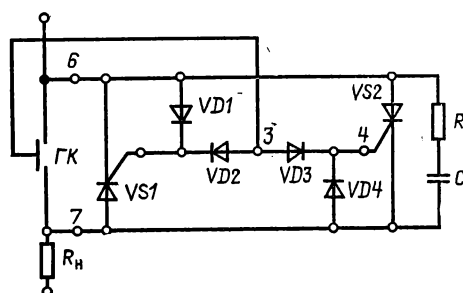


Рис. 29.24. Схема гибридного контактора (на основе бездугового контактора серий МК2 и МК3)

ется на управляющий электрод соответствующего тиристора VS через диод VD2 либо через VD3. Коммутируемая цепь полностью отключается при переходе переменного тока в тиристоре через нуль. Полное падение напряжения на открытом тиристоре составляет не более $1,5 \text{ В}$, что недостаточно для образования дуги на главных контактах ГК. В промежутках между коммутациями в пределах рабочих токов во включенном положении тиристоры шунтированы контактами ГК и ток по ним не проходит, так как падение напряжения на контактном переходе не превышает $0,2 \text{ В}$, что недостаточно для отпирания тиристора.

Диоды VD1, VD4 предназначены для защиты управляющих переходов тиристоров от возможного превышения напряжения на них выше допустимого, цепь RC — для снижения скорости нарастания и амплитуды восстанавливающегося напряжения на тиристорах в моменты их включения после коммутации. Кратковременные перенапряжения в сети не приводят к самопроизвольному включению тиристоров.

В синхронных отключающих устройствах переменного тока осуществляется фиксирован-

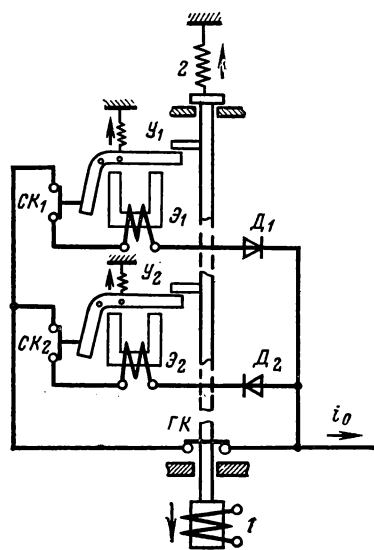


Рис. 29.25. Синхронный контактор, основанный на электромагнитном принципе

ное размыкание контактов перед нулевым мгновенным значением тока, благодаря чему достигается практически бездуговое отключение цепи тока, если в момент его перехода через нуль будет выполнено условие гашения дуги (рис. 29.21). На рис. 29.25 дана схема одного из вариантов синхронного аппарата. При снятии напряжения с включающей обмотки 1 отключающая пружина 2 разомкнет главные контакты ГК и отключаемый ток i_0 перейдет в одну из параллельных ветвей с синхронными контактами СК₁ или СК₂. Этот ток будет удерживать во включенном состоянии электромагниты Э₁ и Э₂. Благодаря отходу вверх удерживающих упоров У₁ и У₂ другой обесточенный электромагнит отключится и разомкнет связанные с ним синхронные контакты СК₁ или СК₂. При подходе тока i_0 к нулю включенный электромагнит отключится и разорвет своими контактами цепь тока практически без образования дуги. Путь для обратной полуволны тока будет закрыт разомкнутыми контактами ГК, синхронными контактами обесточенного электромагнита СК и диодом Д в цепи того электромагнита, по которому проходил ток.

29.5. КОНТАКТЫ И ПУСКАТЕЛИ

Контактор — это двухпозиционный коммутационный аппарат с самовозвратом, предназначенный для частых коммутаций токов, не превышающих токи перегрузки, и приводимый в действие приводом.

Пускатель — это коммутационный аппарат для прямого пуска, остановки и защиты электродвигателей.

В табл. 29.16 дана характеристика для разных категорий применения контакторов. Классы механической износостойкости, определяемые предельным числом операций аппарата в обесточенном состоянии, даны в табл. 29.17.

Таблица 29.17. Параметры классов износостойкости

Классы износостойкости контакторов	Допустимое число циклов в час	Механическая износостойкость, млн. циклов
I	30	0,25; 0,3
II	150	1,25; 1,5
III	600	5,6; 1,6
IV	1200	10
V	До 3600	16

Примерный порядок расчета контактора и пускателя

Заданы: номинальный ток главных контактов $I_{ном}$; предельный отключаемый ток $I_{п} = 5 \div 20 I_{ном}$ А; номинальное напряжение $U_{ном}$; электрическая износостойкость $N_{эл}$; относительная продолжительность включений ПВ %; частота циклов включено — отключено z в час.

1. Определяется сечение токоведущих частей в режиме протекания $I_{ном}$ из условия,

чтобы температура нагрева не превышала допустимую по классам нагревостойкости изоляции, с которой соприкасается конструктивно токоведущая часть. Для кратковременного и повторно-кратковременного режимов расчет проводится по эквивалентному продолжительному току (см. § 29.3). С учетом нагрева дугой токоведущих частей эквивалентный ток, который вызвал бы тот же нагрев, что и номинальный ток при длительном его протекании, примерно равен:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{ном}} \sqrt{\frac{\text{ПВ } \%}{100} + \frac{z}{600} \sqrt{\frac{\text{ПВ } \%}{100}}}$$

2. По найденному сечению токоведущих частей рассчитывается термическая стойкость аппарата — совокупность токов I_k и времени t_k (см. § 29.3). Обычно ток термической стойкости не должен быть ниже предельно отключаемого тока $I_{п}$, чтобы не увеличивать сечение токоведущих частей при сопоставимых временах термической стойкости и длительности протекания предельно отключаемого тока.

3. Рассчитывается сила нажатия в контактах F_k в режиме длительного протекания номинального тока из условия, чтобы температура нагрева контактной точки не превышала допустимую (§ 29.3).

4. При найденном (в п. 2) токе термической стойкости (иногда при предельном отключаемом токе) рассчитывается сила контактной пружины, обеспечивающая отсутствие приваривания контактов и предотвращающая их отброс вследствие электродинамических усилий. При переменном токе в расчет принимается ударный ток:

$$I_y = \sqrt{2} K_y I_k,$$

где I_k — действующее значение предельного тока; K_y — ударный коэффициент (для низковольтных сетей и установок 1,3).

Результирующая сила контактной пружины выбирается как наибольшая из полученных при расчетах в пп. 3 и 4. По ней рассчитываются конструктивные параметры контактных пружин.

5. Рассчитывается раствор контактов из условия надежного гашения малых критических токов. При постоянном токе раствор контактов может быть принят равным критической длине дуги $l_{кр}$, рассчитанной по формуле § 29.4. Обычно раствор контактов не превышает 20 мм.

6. Рассчитываются параметры системы магнитного дутья и дугогасительной системы, при которых обеспечивается надежное гашение дуги в течение времени, не превышающего 0,1 с во всем диапазоне отключаемых токов — от 5 А до $I_{ном}$.

7. Рассчитывается наружная поверхность охлаждения S_n дугогасительной камеры (см. § 29.4).

8. По заданной коммутационной износостойкости контактов N_k рассчитывается объем материала контактов для их износа. Необходимо при расчете время дуги t_d определяется в п. 6. По найденному объему V_0 и заданной ширине контакта определяют линей-

Т а б л и ц а 29.16. Характеристика режимов, соответствующая разным категориям применения контакторов

Категория применения	Режим нормальных коммутаций						Режим редких коммутаций					
	Включение			Отключение			Включение			Отключение		
	Коммутируемый ток в отношении к номинальному	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи или постоянная времени, мс
Основное применение												
Переменный ток												
A ₁	1	1	0,95	1	1	0,95	—	—	—	—	—	—
A ₂	2,5	1	0,65	2,5	1	0,65	4	1,1	0,65	4	1,1	0,65
A ₃	6	1	0,35	1	0,17	0,35	10	1,1	0,35	8	1,1	0,35
A ₄	6	1	0,35	6	1	0,35	10	1,1	0,35	8	1,1	0,35
Постоянный ток												
D ₁	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—
D ₂	2,5	1	10	2	0,3	10	10	1,1	10	10	1,1	10
D ₃	2,5	1	10	2,5	1	10	10	1,1	10	10	1,1	10

Примечания: 1. Режимы, характеризующие применение контакторов для коммутации конденсаторов и ламп с вольтфрамовой нитью, не нормируются.
 2. Переменный ток выражен действующим значением симметричной составляющей.
 3. Допуск на коэффициент мощности $\pm 0,05$; допуск на постоянную времени $\pm 15\%$.

ный износ контактов σ_d и по нему провал контактов:

$$\alpha \approx 2,5 \sigma_d.$$

9. По кинематической схеме контактора находится коэффициент приведения $k_{пр}$ сил и расстояний к воздушному зазору тягового электромагнита. С учетом $k_{пр}$ на графике $P = f(\delta)$ откладываются приведенные значения провала контактов (отрезок $\delta_0 - \delta_{кр}$ на рис. 29.8), раствора контактов (отрезок $\delta_{кр} - \delta_n$), силы нажатия в контактах (отрезок $1-2$). Кроме того, наносится часть противодействующей характеристики P_n , обусловленная расчетной силой контактных пружин (отрезок $5-2$), силой выбранной возвратной пружины и весом подвижной системы (отрезок $a-1$).

По построенной характеристике противодействующих сил $1-2-5$ выбирается тип тягового электромагнита и рассчитываются параметры магнитной системы (§ 29.2).

При необходимости рассчитываются коэффициент возврата (§ 29.2) и вибрация контактов при включении. Грубая оценка времени первого отброса контактов может быть сделана по формуле

$$t_1 \approx mv/P_{пр},$$

где m — масса подвижного контакта; v — скорость подвижного контакта к моменту удара о неподвижный; $P_{пр}$ — сила предварительного сжатия контактной пружины.

Суммарное время вибрации контактов не должно превышать нескольких миллисекунд. Для грубой оценки угловой скорости движе-

ния контакта рычажного типа в момент соприкосновения пригодно соотношение

$$\omega = \sqrt{\frac{2S_{a-1-2-3-4-a}}{J_{\Pi}}},$$

где J_{Π} — момент инерции подвижной системы контактора относительно оси вращения якоря в системе клапанного типа; $S_{a-1-2-3-4-a}$ — избыточная энергия тягового электромагнита, развитая до момента касания контактов и определяемая площадью $a-1-2-3-4-a$ на рис. 29.8.

Контакты постоянного тока

Технические данные наиболее распространенных контакторов постоянного тока приведены в табл. 29.18. На рис. 29.26 дана конструктивная схема одной из наиболее распространенных разновидностей таких контакторов КРВ 600.

Контакты переменного тока

Общие технические параметры наиболее распространенных контакторов даны в табл. 29.19; временные параметры и токи обмоток для некоторых контакторов — в табл. 29.20.

На рис. 29.27 дана конструктивная схема контактора серии КТ-6000 для тяжелых режимов работы. Для некоторых типов таких контакторов в табл. 29.21 приведены значения допустимых токов для разных режимов работы.

В настоящее время перспективны бездуговые контакторы с полупроводниковой при-

Т а б л и ц а 29.18. Контакты

Тип	Номинальные		Обмотка		Собственное время, с		Износостойкость		Допустимая частота срабатываний, 1/ч	Назначение особенности конструкции, дополнительные сведения. Цена, руб.
	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В	Мощность, Вт	Включение	Отключение	Механическая	Коммутационная		

Контакты постоянного тока

КР1	220	20, 40, 75	110	20	0,1	0,04	—	—	1200	6—19 8—12 106 106 106 Для тяжелых режимов работы: конструктивная схема на рис. 29.26. 12—40,5
КР2			220	180	0,2—0,3	0,1	—	—	240	
КР7	660	2500	110, 220	180	0,25	0,07	—	—	240	
КР207	600	2500	110, 220	30—70	0,2	0,25	10 ⁷	—	300—1200	
КРВ600	220	63, 100, 160, 250, 630	110, 220	—	—	—	—	—	—	
КМВ621	220	50	48—220	—	0,05	—	—	—	—	Для управления электромагнитными приводами высоковольтных выключателей Для крановых установок и электротранспорта. 8—16.
КРД100	220	25—250	110—440	35	—	—	10 ⁷	10 ⁶	1200	

Контакты постоянного и переменного тока

МК1	220, 500	40	24—200	38	0,06	0,04	10 ⁷	—	—	Общего назначения, экспортное и тропическое исполнения. 22—33,5 20—302 С магнитным залипанием. 5 С пневматической приставкой выдержки времени до 60 с Вибро- и ударостойкие. 13,5—57,0
КМ2000	220, 380	До 600	До 380	50	—	—	—	—	600	
КМЗ-0	220, 380	40	127—220	—	—	—	10 ⁶	—	—	
РПК1	440, 500	10	До 500	—	—	—	10 ⁷	—	—	
КН100-400	200	25—200	До 320	10—50	0,15	0,03	—	—	—	

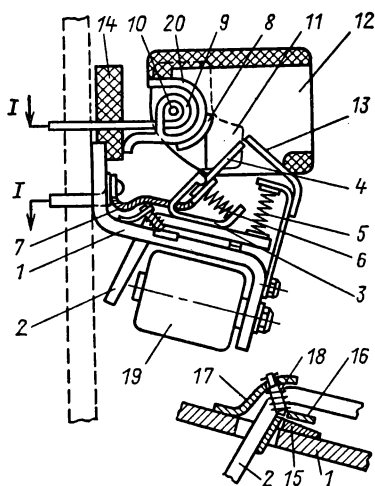


Рис. 29.26. Конструктивная схема контактора КПВ6000:

1 — стальная скоба — основание; 2 — якорь; 3 — скоба; 4 и 8 — подвижный и неподвижный контакты; 5 — возвратная пружина; 6 — контактная пружина; 7 — медная гибкая связь; 9 — катушка магнитного дутья (м.д.); 10 — сердечник системы м.д.; 11 — стальные полюсы м.д.; 12 — дугогасительная камера; 13 и 20 — дугогасительные рога; 14 — изоляционное основание; 15 — вставка — призма вращения; 16 — сменная пластина; 17 — планка; 18 — пружина; 19 — включающая катушка

ставкой (см. рис. 29.24) и вакуумные контакторы. В табл. 29.22 приведены некоторые параметры таких контакторов.

Пускатели переменного тока

Наиболее распространенные серии пускателей с контактной системой и электромагнитным приводом: ПМЕ, ПМА, ПА, ПВН, ПМЛ.

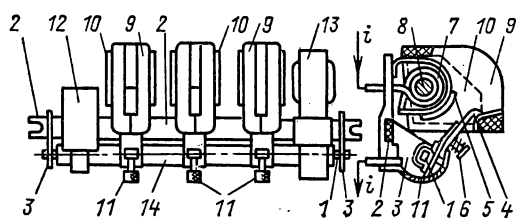


Рис. 29.27. Конструктивная схема контактора КТ6000:

1 — вал; 2 — металлическая изолированная рейка; 3 — подшипники; 4 и 5 — подвижный и неподвижный контакты; 6 — контактная пружина; 7 — катушка магнитного дутья (м.д.); 8 — сердечник системы м.д.; 9 — дугогасительная камера; 10 — полюсы системы м.д.; 11 — гибкая медная связь; 12 — узел вспомогательных контактов; 13 — электромагнит; 14 — изоляционный слой на металлическом валу

1. *Серия ПМЕ.* Это пускатели с прямоходовой магнитной системой и управлением на переменном токе. Напряжение от 36 до 500 В. Используются для управления электродвигателями с короткозамкнутым ротором. Выпускаются в открытом, защищенном и пылебрызгонепроницаемом исполнении, с тепловыми реле и без них, бывают реверсивными и нереверсивными.

Защищенное исполнение ПМЕ-031, 032, 051, 052, 081, 084, 121, 122, 123, 124, 221, 222, 223, 224; пылебрызгонепроницаемое исполнение ПМЕ-061, 062, 091, 092, 093, 094, 131, 133, 132, 134, 231, 232, 233, 234, нечетные — без теплового реле, четные — с тепловым реле; последние цифры в обозначении: 1 и 2 — нереверсивные пускатели. Пускатели серии ПМЕ-200, а также ПМЕ-111Т, ПМЕ-113Т имеют тропическое исполнение. В табл. 29.23 и 29.24 представлены технические параметры и габаритные размеры для типов пускателей этой серии.

Таблица 29.19. Контакторы переменного тока

Тип	Наименование		Число полюсов	Допустимая частота включений, 1/ч	Дополнительные сведения	Цена, руб.
	Напряжение, В	Ток, А				
КТ6000	380 и 660	100, 160, 250 400, 630, 1000	2, 3, 4 и 5	1200	Для тяжелых режимов работы: конструктивная схема на рис. 29.27, $N_M=10^6$, $I_K=10$ кА, $I_{T,C}=7$ кА при $t=0,2$ с, $U_{BT}=127 \approx 380$ В	18—116
КТ7000	380 и 660	100, 160	2, 3, 4 и 5	600	$N_M=10^6$, $U_{BT}=127, 220$ и 380 В	—
КВДК630	660	630	3	3800	Вакуумный контактор, $N_M=2 \cdot 10^6$	—
КТД121	500	40	3	1200	—	—
КТПВ600	380	63, 100, 160—250	2	1200	Для управления асинхронными двигателями в тяжелых условиях смешанного питания металлургических приводов, где требуются повышенные N_M и N_K . $U_{BT}=110$ и 220 В (пост. ток)	20—47
КТП6000	380 и 660	100, 160, 250, 400 и 630	2, 3 и 4	1200	$N_M=15 \cdot 10^6$, $U_{BT}=24, 48, 110$ и 220 В (пост. ток)	—
К1000	1600	400 (без охлаждения водой); 800 (при охлаждении водой и частоте 800 Гц)	—	—	Контакторы на повышенную частоту тока от 500 до 8000 Гц, $U_{BT}=127, 220$ и 380 В	—

Обозначения: U_{BT} — напряжение втягивающей обмотки; N_M и N_K — механическая и коммутационная износостойкость; $I_{T,C}$ — термическая стойкость.

Т а б л и ц а 29.20. Технические данные контакторов переменного тока

Контактор		Ток обмотки, А						Собственное время, с		Цена, руб.
Тип	Номи- нальный ток, А	в рабочем состоянии при напряжении, В			пусковой при напряжении, В			срабаты- вания	спуска- ния	
		127	220	380	127	220	380			
КТ6000	100	—	0,21	0,14	—	2,1	1,4	0,03—0,04	0,02	18—116
	160	—	0,21	0,14	—	2,1	1,4	0,03—0,04	0,02	
	250	1,3	0,72	0,44	13	7,4	4,4	0,04	0,012	
	400	—	0,98	—	—	9,8	—	0,05	0,02	
	630	—	1,65	0,98	—	16,5	9,8	0,05	0,02	
КТ7000	100	—	0,26	0,12	—	2,5—3,7	1,2—1,8	0,034	0,015	25—40
	160	—	0,26	0,13	—	2,6—3,9	1,2—1,8	0,3	0,009	
КНТ	10	0,123	0,07	0,0435	0,123	0,07	0,0435	0,6	0,4	80—400
	25	0,215	0,12	0,75	0,215	0,12	0,076	0,6	0,4	
	60	0,4	0,21	0,125	2,3	1,22	0,126	0,6	0,4	
	100	0,43	0,24	0,146	2,5	1,35	0,846	0,6	0,4	
	200	0,6	0,35	0,2	3,12	1,78	1,0	0,6	0,6	

Т а б л и ц а 29.21. Допустимые токи контакторов КТ6000 для разных режимов работы, А

Тип	Продолжительный режим	Повторно-кратковременный режим			
		Режим АС-3 (ПВ 40 %, частота циклов 600 в час)		Режим АС-4 (ПВ 40 %, частота циклов 1200 в час)	
		Ток включения при $U_{ном}$	Ток отключения при $0,17 U_{ном}$	Ток включения при $U_{ном}$	Ток отключения с $1,17 U_{ном}$
КТ6014	60	480	80	140	140
КТ6024	75	600	100	180	180
КТ6022	120	900	160	280	280
КТ6032	185	1500	250	450	450
КТ6042	300	2400	400	720	720
КТ6052	470	3800	630	1200	1200

Т а б л и ц а 29.22. Трехполюсные контакторы

Контактор	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Износостойкость механическая	Износостойкость коммутационная	Коммутационная способность, А	Частота срабатываний в час	Габариты, мм	Масса, кг
Бездуговые								
БКБ	100	380	10^7	10^7	2000	2000	$380 \times 260 \times 366$	16
МК2-20Е	63	380	—	—	—	1200	$150 \times 220 \times 190$	4,85
МК2-30Е	63	380	—	$3 \cdot 10^6$	1200	1200	$150 \times 225 \times 186$	5,25
МК3-30Е	100	660	—	$3 \cdot 10^6$	—	1200	$150 \times 225 \times 186$	5,25
Вакуумный КВДК-630	630	660	—	$2 \cdot 10^6$	—	—	$271 \times 224 \times 214$	—

Износостойкость и частота включений для пускателей ПМЕ-200 соответствуют:

Механическая	10^7
Коммутационная	$2 \cdot 10^6$
Частота включения при ПВ=70 %	600

Аналогичные значения для пускателей ПМЕ-111 и 113 — $5 \cdot 10^6$, $0,5 \cdot 10^6$ и 1200.

2. **Серия ПАЕ.** Пускатели с управлением на переменном токе: отдельные исполнения ПАЕ-313, 314, 411, 412 применяются преимущественно в станкостроении.

Пускатели ПАЕ имеют ряд исполнений, например: открытое ПАЕ-310 и 410; защищенное ПАЕ-320 и 420; неререверсивное ПАЕ-301 и 401; неререверсивное с тепловой защитой ПАЕ-302, 402; реверсивное без тепловой защиты ПАЕ-303 и 403; реверсивное с тепловой защитой ПАЕ-304 и 404, 500 и 600.

В пускателях ПАЕ-300 для тепловой защиты применяются тепловые реле ТРН-40, в пускателях ПАЕ-400, 500 и 600 — реле ТРП1.

Конструктивная схема пускателя ПАЕ дана на рис. 29.28. Технические данные некоторых типов пускателей этой серии имеются в табл. 29.23.

3. **Серия ПМА.** Пускатели предназначаются для управления асинхронными двигателями мощностью 1,1—75 кВт; имеют реверсивные и неререверсивные исполнения, с тепловым и без теплового реле, открытое и защищенное исполнения; износостойкость механическая в аппаратах на ток до 63 А составляет $16 \cdot 10^5$, выше 63 А — 10^7 ; коммутационная — соответственно $3 \cdot 10^6$ и $2,5 \cdot 10^6$. Номинальный ток контактов вспомогательной цепи лежит в пределах от 4 до 10 А. В табл. 29.25 приведены технические данные пускателей ПМА. Цена пускателей 30—80 руб.

Т а б л и ц а 29.23. Технические показатели пускателей серий ПМЕ и ПАЕ

Показатель	ПМЕ-000	ПМЕ-10	ПМЕ-200	ПАЕ-300	ПАЕ-400	ПАЕ-500	ПАЕ-600
Номинальный ток А, при напряжениях 380/500 В	3/1,5	10/6	25/14	40/21	63/35	110/61	146/80
Предельный включаемый и отключаемый ток, А, при напряжении 380 В и $\cos \varphi = 0,4$	30	100	280	400	630	100	1500
Провал главных контактов, мм	$2,4 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$	$2,2 \pm 0,5$	$3,5 \pm 0,5$	$4 \pm 0,5$	$4 \pm 0,5$
Начальное нажатие на контактный мостик, Н	1,1	2,0	4,6	13	18	33	50
Раствор главных контактов, мм	2,8	2,5	3	3	3,5	3,5	4
Материал контактной накладки	Серебро	КМК-А30	КМК-А30	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10
Пусковая мощность, потребляемая обмоткой, В·А	65	130	160	260	465	800	3400
Номинальная мощность обмотки, В·А	3,6	6	8	17	20	26	38
Масса, кг	0,33	0,64	0,65	2,66	4,3	7,6	10,3
Цена, руб.	2—12	3—12	6—17	9—32	17—52	21—60	27—74

Т а б л и ц а 29.24. Наиболее распространенные исполнения магнитных пускателей серий ПМЕ и ПАЕ

Тип	Номинальный ток, А, при напряжениях 380/500 В	Количество контактов		Габаритные размеры, мм	Наличие теплового реле	Цена, руб.
		закрывающих	размыкающих			
ПМЕ-001	3/1,5	1	4	75×65×119	Нет	3,9
ПМЕ-002	3/1,5	1	4	121×83×101	Есть	5,3
ПМЕ-003	3/1,5	1	4	90×150×118	Нет	7
ПМЕ-004	3/1,5	2	2	135×150×118	Есть	9
ПМЕ-111	10/6	2	2	68×85×84	Нет	3,0
ПМЕ-112	10/6	4	4	154×102×91	Есть	5,1
ПМЕ-113	10/6	4	4	164×90×103	Нет	6,5
ПМЕ-114	10/6	2	2	232×90×107	Есть	8,5
ПМЕ-211	25/14	2	2	102×90×118	Нет	5,6
ПМЕ-212	25/14	4	4	195×98×126	Есть	8,0
ПМЕ-213	25/14	4	4	130×205×155	Нет	12,8
ПМЕ-214	25/14	2	2	180×205×155	Есть	13,8
ПАЕ-311	40/21	2	2	214×114×144	Нет	9,7
ПАЕ-312	40/21	4	2	275×114×121	Есть	13,3
ПАЕ-313	40/21	4	2	214×239×114	Нет	21,5
ПАЕ-314	40/21	2	2	264×239×121	Есть	25
ПАЕ-411	63/35	2	2	290×182×135	Нет	17
ПАЕ-412	63/35	4	2	290×183×135	Есть	22,0
ПАЕ-413	63/35	4	2	275×343×135	Нет	34,0
ПАЕ-414	63/35	2	2	275×343×135	Есть	22,0
ПАЕ-511	110/61	4 ²	2	335×200×156	Нет	21,0
ПАЕ-512	110/61	4	2	335×200×155	Есть	26
ПАЕ-513	110/61	2 ⁴	2	320×338×170	Нет	42,5
ПАЕ-514	110/61	2	2	320×338×170	Есть	48,0
ПАЕ-611	146/80	4 ²	2	380×230×190	Нет	27,0
ПАЕ-612	146/80	4	2	380×230×190	Есть	32,5
ПАЕ-613	146/80	4	2	285×435×190	Нет	56
ПАЕ-614	146/80	4	2	385×435×190	Есть	63,0

Т а б л и ц а 29.25. Пускатели серии ПМА

Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Наибольшая мощность управляемого двигателя при 380 В, кВт	Габаритные размеры (высота, глубина, ширина), мм	Масса, кг
4	500	1,1	65×60×100	0,6
10	500	4,0	74×90×109	0,8
25	500, 660	10	90×98×115	1,1
40	500, 660	17	108×110×135	1,8
63	500, 660	30	120×120×158	2,6
100	500, 660	55	135×150×170	3,3
160	500, 660	75	160×170×200	5

4. *Серия ПМЛ.* Пускатели предназначены для управления асинхронными электродвигателями в повторно-кратковременном режиме и рассчитаны на номинальные токи 10, 25, 40 и 63 А (с управлением на постоянном токе). Механическая износостойкость не менее 16 млн. срабатываний. Коммутационная износостойкость в категории применения (АС-3) — 3 млн. циклов на номинальный ток 10 А и 2 млн. циклов — на токи 25, 40 и 63 А.

Тиристорные пускатели используются как для дистанционного включения и отключения электрооборудования, так и для защиты от токов короткого замыкания и перегрузки.

Таблица 29.26. Технические показатели трехфазных тиристорных пускателей

Показатель	ПТ-16380-У5, ПТ-16380Р-У5	ПТ-40380-У5, ПТ-40380Р-У5	ПТК-100-380- БПК-1000	ПТУ-63-380
Назначение	Включение и отключение асинхронных двигателей	Включение, отключение и реверс асинхронных двигателей	Для коммутации и защиты от перегрузок, коротких замыканий, обрыва фаз	Для коммутации и защиты от коротких замыканий и перегрузок
Номинальное напряжение, В	380	380	380	380
Номинальный ток, А	16	40	100	63
Ток включения, А	100—130	200—360	—	—
Ток отключения, А	16—25	40—63	—	—
Стойкость при сквозных токах, А:				
термическая (при 0,1 с)	400	900	—	—
электродинамическая	560	1650	—	—
Ток утечки, мА	20	20	20	20
Сопротивление изоляции в холодном состоянии, МОм	50	50	—	—
Коммутационная способность, А	400	900	1000	1700
Ток включения, А	580	1650	1700	1700

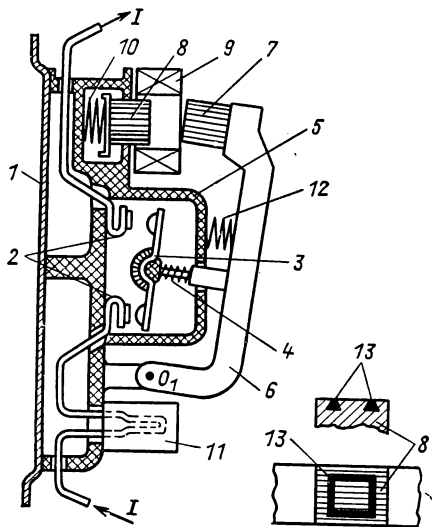


Рис. 29.28. Конструктивная схема пускателя ПАЕ:

1 — металлическое основание; 2 и 3 — неподвижные и подвижные мостиковые контакты; 4 — контактная пружина; 5 — закрытая дугогасительная камера; 6 — траверса; 7, 8 и 9 — якорь, катушка и магнитопровод тягового электромагнита; 10 — амортизирующие пружины; 11 — тепловое реле; 12 — отключающая пружина; 13 — короткозамкнутый виток на магнитопроводе

В табл. 29.26 приведены технические данные отдельных серий этих аппаратов.

29.6. АВТОМАТИЧЕСКИЕ
ВЫКЛЮЧАТЕЛИ
И ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Автоматические выключатели (автоматы) и предохранители предназначаются главным образом для защиты электрических сетей и установок от аварийных режимов работы (короткого замыкания, перегрузки, понижения напряжения) и защиты людей от поражения электрическим током. Они снабжены расцепителями, которые срабатывают при возникно-

влении аварийных режимов установки и механически воздействуют на удерживающий элемент аппарата. При срабатывании они освобождают его подвижную систему. Наиболее распространенные расцепители автоматов (по принципу действия) — это электромагнитные, тепловые и полупроводниковые. Основы расчета электромагнитных элементов изложены выше.

Некоторые разновидности автоматических
выключателей

Основные виды автоматических выключателей: универсальные, установочные, быстродействующие (ВАБ), гашения магнитного поля (АГП), защиты от утечек на землю.

Быстродействующие автоматы (ВАБ) постоянного тока устанавливаются в преобразовательных установках. Они обладают способностью ограничивать ток короткого замыкания за счет быстрого образования дуги между контактами и интенсивного роста ее сопротивления. Работают на номинальных напряжениях около 1000 В при номинальных токах в тысячи ампер; время их срабатывания измеряется несколькими сотыми долями секунды (0,01—0,03 с).

Автоматы гашения магнитного поля (АГП) предназначены для снятия поля возбуждения крупных синхронных машин при возникновении в них внутреннего короткого замыкания. На рис. 29.29 дана принципиальная схема такого автомата. Характерные технические параметры автоматов серии АГП:

Номинальные токи, А До 10 000
Номинальные напряжения, кВ 1—2
Число полюсов 2

Дугогасительная система — дугогасительная решетка с магнитным дутьем, обеспечивающая вращение дуг по пластинам.

Автоматы защиты от утечки на землю служат для защиты людей и животных от поражения электрическим током, а также для защиты от токов короткого замыкания и перегрузок в сетях с глухозаземленной нейтралью. Блок защиты состоит из трансформатора

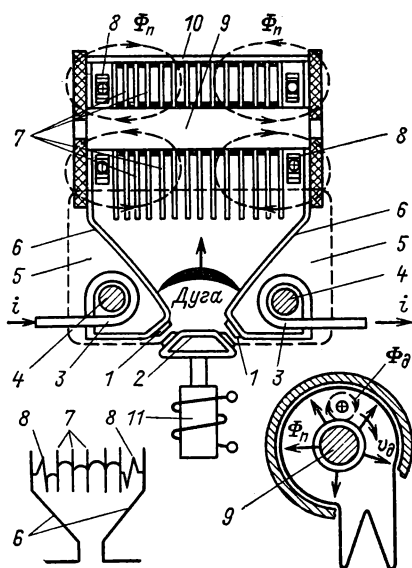


Рис. 29.29. Принципиальная схема автомата гашения магнитного поля АГП:

1 и 2 — контакты; 3—5 — система магнитного дутья; 6 — дугогасительные рога; 7 — пластины дугогасительной решетки; 8 — катушки радиального магнитного поля; 9 и 10 — детали магнитопровода дугогасительной системы; 11 — приводной электромагнит

нулевой последовательности и полупроводникового усилителя с блоком питания. Технические данные такого автомата серии АЕ2046-13Р на номинальное напряжение 380 В и ток 40 А таковы:

Кратность тока отсечки	12
Установка защиты при однофазном замыкании на землю, мА	15
Время срабатывания, с	0,1
Время готовности к работе, с	0,2
Отключающая способность, кА	10
Износостойкость коммутационная, циклов	25 000
Износостойкость механическая, циклов	50 000

Преимущественное распространение получили универсальные и установочные автоматы. Вторые отличаются от первых лишь наличием изоляционного кожуха, благодаря чему они могут устанавливаться в общедоступных помещениях. Универсальные автоматы постоянного и переменного тока работают главным образом в распределительных устройствах низкого напряжения.

Наиболее распространенные серии таких аппаратов:

1. **АЗ000.** Эта разновидность автоматов имеет много различных исполнений и является в сравнении с другими видами универсальных установочных аппаратов наиболее распространенной. Серия АЗ700 имеет токоограничивающее и селективное исполнения. В первом исполнении электродинамическое устройство обеспечивает быстрое размыкание контактов, образование дуги и ввод в отключаемую цепь сопротивления дуги. Во втором исполнении используется устройство, компенсирующее электродинамические силы отталкивания контактов.

В табл. 29.27 приведены характерные исполнения автоматов АЗ000; в табл. 29.28 —

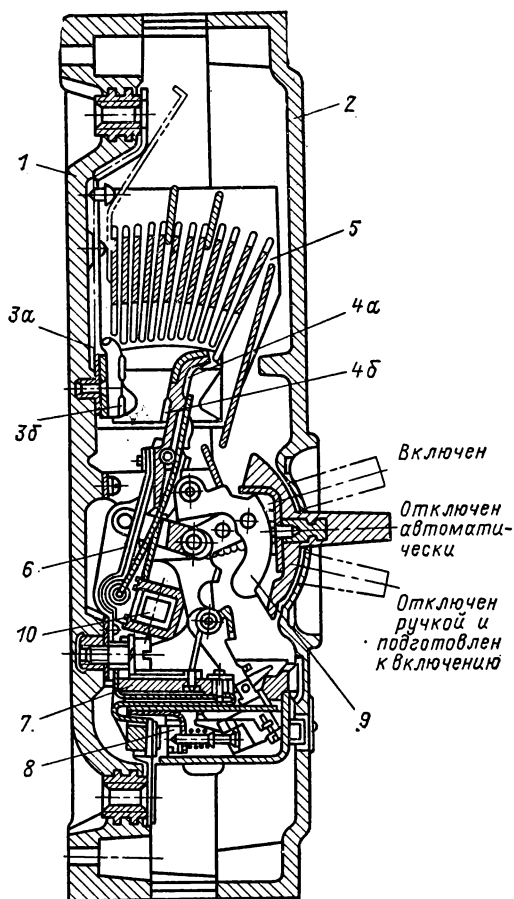


Рис. 29.30. Автомат АЗ130:

1 — основание; 2 — изолирующий кожух; 3 и 4 — контактные накладки; 5 — дугогасительная решетка; 6 — гибкая токоведущая связь; 7 и 8 — узел расцепителей; 9 — механизм свободного расцепления; 10 — вал

технические параметры некоторых автоматов этой серии. На рис. 29.30 дан разрез автомата АЗ130, а на рис. 29.31 защитные характеристики автоматов этой серии.

2. **Электрон.** Осуществляют защиту в сетях с постоянным напряжением до 440 и переменным 660 В. Устанавливаются в распределительных устройствах. Выпускаются с ручным, электромагнитным и электродвигательным приводами. Имеют по два или три главных полюса, по четыре замыкающихся и размыкающихся вспомогательных контактов. В табл. 29.29 приведены основные технические данные отдельных типов этого аппарата.

3. **АЕ-1000, АЕ-2000** предназначены для защиты электрических цепей от перегрузок и коротких замыканий; имеют электромагнитные и комбинированные расцепители, допускают частоту оперативных переключений до 30 операций в час. В табл. 29.30 для нескольких типов автоматов АЕ-2000 приведены допустимые токи короткого замыкания.

4. **АП-50.** Кроме защиты от перегрузок и токов короткого замыкания, могут использоваться для пуска асинхронных двигателей с

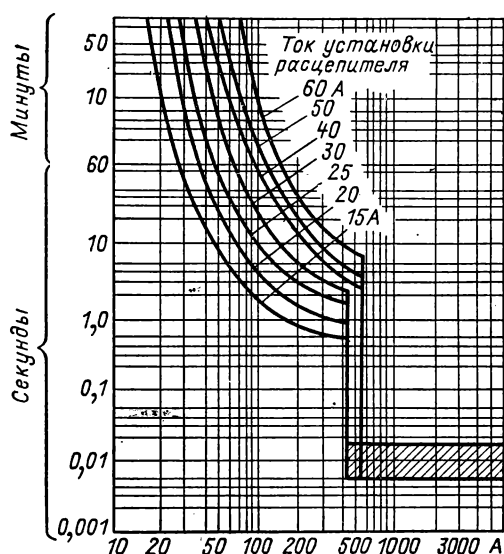


Рис. 29.31. Защитные характеристики автоматов АЗ10 и АЗ20

короткозамкнутым ротором, если защитные характеристики электродвигателей соответствуют защитным характеристикам автомата. Выпускаются в пластмассовом корпусе (рис. 29.32). Цена от 2 до 4,5 руб.

5. АЗ-50. Назначение то же, что и у автомата АП-50. Выпускается в пластмассовом корпусе и дополнительном металлическом корпусе (брызгозащищенное исполнение). Более высокие значения предельного отключаемого тока в сравнении с АП-50 достигнуты в основном благодаря двоянной контактно-дугогасительной системе (на той и другой стороне

Т а б л и ц а 29.27. Исполнения автоматов серии АЗ000

Тип	Напряжение, В	Частота тока, Гц	Назначение, исполнение
АЗ100	220—, 500~	50	Защита от перегрузок и коротких замыканий и нечастые коммутации электрических цепей
АЗ100р	220—, 500~	50	Для судовых установок
АЗ100П	230—, 400~	50	Для передвижных установок
АЗ100/40	200—, 500~	50	Имеют клиновые контактные зажимы
АЗ100Т	400—, 500~	400 и 2500	—
АЗ100ПТ	230□, 400~	50	Тропическое исполнение, для передвижных электростанций и агрегатов
АЗ700	220—, 600~	50	Токоограничивающие и селективные; с полупроводниковыми максимальными расцепителями серии РП; допускают присоединение как медных, так и алюминиевых шин; имеют втычное исполнение

мостикового контакта, вращающегося при срабатывании вокруг своего центра). Могут исполняться с электромагнитным расцепителем и гидравлическим замедлителем срабатывания, существуют исполнения на 50 и 400 Гц (например, АЗ-50-400-2МГ). Цена до 23 руб.

6. А-63. Используются для защиты от перегрузок и коротких замыканий. Исполнение

Т а б л и ц а 29.28. Автоматические воздушные выключатели серии АЗ000

Тип	Номинальный ток, А	Напряжение, В	Число полюсов	Возможность заказа с расцепителем		Ток установки расцепителя, А	Предельный ток отключения, кА		Время отключения, с	Габаритные размеры, мм	Примечание. Цена, руб.
				тепловым	электромагнитным		постоянный	переменный			
АЗ160	50	110 и 220	1, 2, 3	Есть	Нет	15—50	1,6—3,6	2,5—4,5	0,025	158×105×89	58—69
АЗ110	100	220	2, 3	Нет	Есть	15—100	5	2,5—10	0,015	237×105×112	10
АЗ120	200	220	2, 3	»	»	15—100	20	18	—	258×153×105	До 25
АЗ130	200	220	2, 3	»	»	100—200	17—28	14—25	0,015	300×199×106	До 40
АЗ140	600	220	2, 3	»	»	250—600	25—50	32—40	0,03	561×217×141	До 69
АЗ710Б—АЗ740Б	160—630	440, 660	2, 3	Есть	»	—	110	40—60	—	225×500×190	Токоограничивающий с полупроводниковыми или электромагнитными расцепителями — по заказам. До 207
АЗ710Ф—АЗ730Ф	160—630	220, 380	2, 3	»	»	—	25—50	25—50	—	225×400×140	Нетокоограничивающий с электромагнитным и тепловым расцепителями. До 108

Т а б л и ц а 29.29. Данные автоматов «Электрон»

Показатель	Тип автомата				
	306 В	310	316 В	325 В	340 В
Номинальный ток, А	630	1000	1600	2500	5000
Коммутационная способность, кА	50	84	84	105	160
Габаритные размеры, мм	470×400×320	580×570×430	730×580×570	550×520×450	600×570×410
Цена, руб.	668	1200	1248	1508	2424

Т а б л и ц а 29.30. Допустимые токи короткого замыкания для автоматов АЕ-2000, кА

Тип	Переменное напряжение, В		Постоянное напряжение, В		Цена, руб.
	380	660	110	220	
АЕ-2010	1—5	—	2—5	—	До 19
АЕ-2030	1—5	1—4	2—5	2—5	
АЕ-2040	3,5—10	3,5—6,5	3,5—10	3,5—10	

8. АС-25 имеют морское и тропическое исполнение, могут работать в передвижных установках при вибрации и тряске.

Технические данные отдельных автоматов приведены в табл. 29.31. В табл. 29.32 даны параметры некоторых автоматических выключателей, а также некоторых других аппаратов на повышенные частоты.

Расцепители

Основные типы расцепителей по функциональному признаку: максимальные, токов перегрузки, независимые, минимального напряжения. Расцепители максимального тока могут срабатывать без выдержки времени, с независимой от тока выдержкой времени и с выдержкой времени, обратно зависимой от тока.

По принципу действия расцепители разделяются на тепловые (термобиметаллические) и электромагнитные.

Замедление срабатывания электромагнитных расцепителей осуществляется гидравлическим, воздушным замедлителем или замедлителем с анкерным механизмом (подобно часовому). В основе расчета электромагнитного расцепителя — расчет собственно электромагнита (см. § 29.2).

Тепловые расцепители (и реле) обычно выполняются на основе биметаллических элементов; свойства наиболее распространенных биметаллов даны в табл. 29.33.

Если толщина каждого компонента биметаллического элемента δ_1 и δ_2 и модули упругости их E_1 и E_2 одинаковы, то для пластинки прямоугольного сечения, закрепленной на одном конце, с учетом обозначений $E_1 = E_2 = E$ и $\delta_1 + \delta_2 = \delta$ имеем выражения:

для стрелы прогиба (рис. 29.33, а)

$$h_0 = \frac{3}{4} \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) (T - T_{\text{окр}}) l^2}{\delta};$$

для максимального напряжения (в пограничном слое), Па,

$$\sigma_{\text{max}} = E (\alpha_1 - \alpha_2) (T - T_{\text{окр}}) / 2;$$

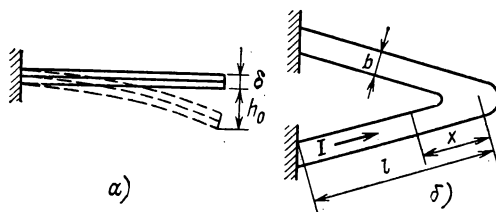


Рис. 29.33. Биметаллический элемент

однополюсное с электромагнитными токовыми расцепителями, с гидравлическим замедлителем срабатывания и без него. Имеют ручной привод, их масса около 0,25 кг, объем около 0,34 дм³. Автомат допускает 50 000 циклов включено — отключено, из них 6000 циклов при номинальном токе и напряжении.

7. АВ-45-1/6000. Автомат для защиты мощных сетей постоянного тока от коротких замыканий и перегрузок. Его коммутационная способность в пределе может достигать до 200 кА при напряжении 5000 В. В этих условиях отключения происходит разрушение некоторых частей автомата и он требует ремонта. Для исключения переброса дуги на металлические части он должен располагаться на расстоянии не менее 2,5 см от них.

Т а б л и ц а 29.31. Параметры ряда автоматических выключателей с электромагнитным расцепителем

Тип	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Число полюсов	Количество вспомогательных контактов		Возможность заказа с тепловым расцепителем	Ток уставки, А	Предельный ток отключения, кА		Время отключения, с	Привод	Габариты	Цена, руб.
				замыкающих	размыкающих			постоянный	переменный				
АК-63	63	200—400	2, 3	1	1	Есть	0,63—63	5	9	0,63	Ручной	145×68×124	6—27
АК-50	50	320—400	2, 3	1	1	—	2—50	4,5	9	0,04	»	113×81×117	8—10
АП-50	50	220—500	2, 3	1, 2	1, 2	Есть	1,6—50	1,252	0,3—2	0,02	»	210×160×143	2—8
А-63	25	110—220	1	—	—	—	0,63—25	2	2,5	—	»	134×28×88	1,5
АЕ-1000	25	240	1	—	—	Есть	6—25	—	1,5	—	»	90×21×77	2,75
АЕ-2000	25, 63, 100	220—500	1, 2, 3	—	—	—	—	10	16	—	»	229×112×115	5—19
АС-25	25	220—380	2, 3	—	—	—	1—20	3,2	2	—	»	73×90×109	10—14
АВ-45/1000	6000	500	1	—	—	—	—	—	—	—	Электродвигательный	1216×500×695	—
АСТ-2/3	25	380	2, 3	—	—	—	—	90	—	0,08	Электромагнитный	120×75×95	—

для силы, действующей на упор на свободном конце, Н,

$$P = \frac{3}{16} \frac{E(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_{\text{окр}}) b \delta^2}{l}$$

В этих выражениях $\alpha_1 - \alpha_2$ — разность температурных коэффициентов линейного расширения компонентов; $T - T_{\text{окр}}$ — разность температур нагрева биметалла и окружающей среды; l , b и δ — длина, ширина и толщина биметалла, м; E — модуль упругости, Па.

Аппарат срабатывает при заданной стреле прогиба h_0 . Пограничный ток (минимальный ток срабатывания) биметаллического элемента U-образной формы (рис. 29.33, б) равен [29.9]:

$$I_{\text{п}} \approx \frac{4}{l} \sqrt{\frac{\delta h_0 k_T}{3(\alpha_1 - \alpha_2) \left[\frac{\rho_6}{\delta b^2} \left(1 - \frac{1}{ch \beta} \right) - \frac{2\rho_T}{Sp} \left(1 + \frac{1}{ch \beta} \right) \right]}}$$

где ρ_6 и ρ_T — удельные электрические сопротивления биметалла и токоведущих частей, подводящих ток к биметаллу, Ом·м; p и S — периметр, м, и площадь поперечного сечения, м², той же токоведущей части; k_T — коэффициент теплопередачи с боковой поверхности, Вт/(м²·°С);

$$\beta = l \sqrt{\frac{2k_T}{\lambda b}};$$

b — ширина биметалла, м; λ — коэффициент теплопроводности биметалла, Вт/(м·°С).

Время срабатывания биметаллического элемента при токе I

$$t_{\text{ср}} = T \ln \frac{I^2 - I_{\text{предв}}^2}{I^2 - I_{\text{п}}^2},$$

где $I_{\text{п}}$ — пограничный ток; $I_{\text{предв}}$ — предварительный ток прогрева; T — постоянная времени нагрева биметалла, с:

$$T = \frac{c \gamma b \delta}{2k_T(b + \delta)};$$

c и γ — теплоемкость, Дж/(г·°С), и плотность, г/м³, биметалла; b и δ — ширина и толщина биметаллической пластины, м.

Плавкие предохранители

Конструктивные схемы некоторых распространенных разновидностей плавких предохранителей даны на рис. 29.34.

Давление внутри закрытого объема предохранителя, Па, постоянного тока можно оценить по формуле

$$p = 0,5 L I_0^2 / V,$$

где L — индуктивность отключаемой цепи, Гн; I_0 — отключаемый ток, А; V — внутренний объем предохранителя, м³.

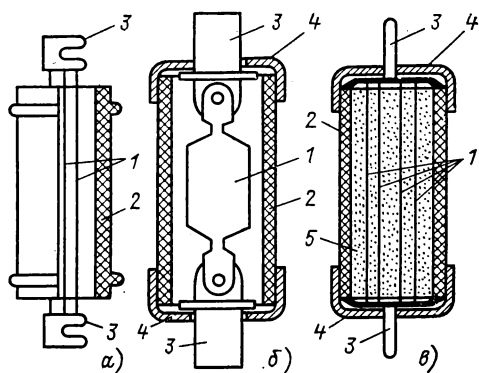


Рис. 29.34. Некоторые разновидности предохранителей:

а — в открытой фарфоровой трубке; б — разборный; в — с наполнителем; 1 — плавкие вставки; 2 — изолирующая трубка; 3 — выводные детали; 4 — колпачки; 5 — наполнитель

Пограничный ток (минимальный ток срабатывания) открытого плавкого предохранителя в воздухе оценивается по формуле

$$I_{\text{п}} = \sqrt{\frac{\pi^2 K_{\text{т}} d^2 (T_{\text{пл}} - T_{\text{окр}})}{4 \rho_0 (1 + \alpha T_{\text{пл}})}},$$

где $K_{\text{т}}$ — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C); d — диаметр плавкой вставки, м; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления материала встав-

ки, °C; $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды, °C; ρ_0 — удельное сопротивление вставки, Ом·м; α — температурный коэффициент сопротивления, °C⁻¹.

Пограничный ток засыпного предохранителя с наполнителем можно оценить по формуле

$$I_{\text{п}} = \pi d \sqrt{\frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{окр}}}{2 \rho_0 (1 + \alpha T_{\text{пл}}) \times \left(\frac{8}{K_{\text{т}} D_{\text{н}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{н}}} \ln \frac{D_{\text{в}}}{d} + \frac{1}{\lambda_{\text{т}}} \ln \frac{D_{\text{н}}}{D_{\text{в}}} \right)}},$$

где $D_{\text{в}}$ и $D_{\text{н}}$ — внутренний и наружный диаметры трубки, м; $\lambda_{\text{н}}$ и $\lambda_{\text{т}}$ — коэффициенты теплопроводности наполнителя и материала трубки, Вт/(м·°C); d — диаметр плавкой вставки.

Защитная (ампер-секундная) характеристика предохранителя приближенно рассчитывается по формулам:

а) открытая плавкая вставка в воздухе

$$t = (1,2 \div 1,3) \left(A' - \frac{A''}{3} \right) S^2 / I^2;$$

б) предохранитель с наполнителем

$$t = (1,7 \div 2,0) (A' + A'') S^2 / I^2,$$

Т а б л и ц а 29.32. Аппараты на повышенные частоты

Наименование аппарата	Тип	Частота, Гц	Напряжение, В	Номинальный ток, А	Цена, руб.
Автомат	A-3123	400	380	15	13
»	A-3124	1100—1500	380	40	17
»	P-3124	2400	500	80	—
Контактор	KHT	400	380	10—200	23—153
»	K1000	2500 и 8000	800 и 1600	400—2400	—
»	KB	1000—15 000	135—650	—	—

Т а б л и ц а 29.33. Свойства биметаллов

Компоненты	Модуль упругости E , МПа	$\alpha_1 - \alpha_2$, °C ⁻¹	ρ , Ом·м	Пределы рабочих температур, °C	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·°C)	Коэффициент температурности, Вт/(м·°C)
ЭН-36+хромоникелевая сталь	$(15-20) \cdot 10^4$	$18 \cdot 10^{-6}$	$0,79 \cdot 10^{-8}$	$-20 \div +200$	—	—
ЭН-36+молибдено-никелевая сталь	$(1-19,5) \cdot 10^4$	$(16-18) \cdot 10^{-6}$	$(0,78-0,96) \cdot 10^{-8}$	$-60 \div +200$	—	—
Н-42+молибдено-никелевая сталь	$(16,4-19,5) \cdot 10^4$	$(12-14) \cdot 10^{-6}$	$(0,68-0,73) \cdot 10^{-8}$	$-60 \div +375$	—	—
Н-42+хромоникелевая сталь	$(16,4-20) \cdot 10^4$	$13,5 \cdot 10^{-6}$	$0,6 \cdot 10^{-8}$	$-60 \div +375$	—	—
ЭН-36+немагнитная сталь	$19,5 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^{-6}$	$0,79 \cdot 10^{-8}$	$-50 \div +200$	$0,5 \cdot 10^3$	12,5
ЭН-36+латунь	$12,7 \cdot 10^4$	$19 \cdot 10^{-6}$	$0,17 \cdot 10^{-8}$	$-50 \div +200$	$0,45 \cdot 10^3$	65,5
ЭН-36+никель	$18,5 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^{-6}$	$0,18 \cdot 10^{-8}$	$-50 \div +200$	$0,49 \cdot 10^3$	42
ЭН-36+бериллиевая бронза	$13,6 \cdot 10^4$	$18 \cdot 10^{-6}$	$0,16 \cdot 10^{-8}$	$-50 \div +200$	$0,46 \cdot 10^3$	42

где

$$A' = \frac{\gamma_c}{\alpha \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha T_{пл}}{1 + \alpha T_{нач}};$$
$$A'' = \frac{\gamma L_c}{\rho_{пл} - \rho_1} \ln \rho_{пл} / \rho_1;$$

S — сечение вставки, м^2 ; I — ток, А ; γ, c, L_c — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$, удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$, теплота плавления материала вставки, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Удельные сопротивления материала вставки при температуре плавления ρ_1 и в расплавленном состоянии $\rho_{пл}$ для некоторых материалов:

Медь	$\rho_1=8,4 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\rho_{пл}=20,4 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Серебро	$\rho_1=7,1 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\rho_{пл}=18 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Цинк	$\rho_1=16 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\rho_{пл}=35 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Свинец	$\rho_1=49 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\rho_{пл}=94 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Условие селективности плавких предохранителей:

открытая вставка в воздухе

$$\frac{S_1}{S_2} > \sqrt{(1,2 \div 1,3) \frac{3A_2' + A_2''}{3A_1'}}$$

предохранитель с наполнителем

$$\frac{S_1}{S_2} > \sqrt{(1,7 \div 2,0) \frac{A_2' + A_2''}{A_1'}}$$

где индекс 1 относится к предохранителю, расположенному по схеме ближе к источнику пи-

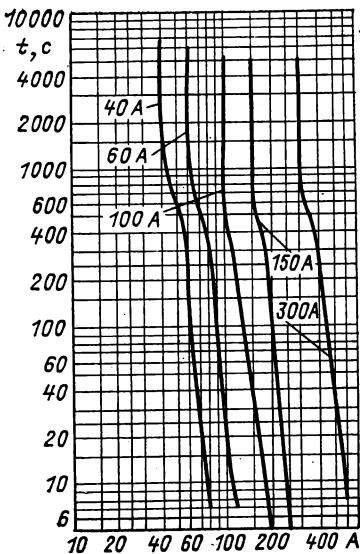


Рис. 29.35. Защитные характеристики предохранителей ПНБ при номинальных токах 40—300 А

тания, а индекс 2 — к более удаленному от источника, но последовательно соединенному с первым предохранителем.

В табл. 29.34 указаны области применения и номинальные параметры для ряда типов наиболее распространенных предохранителей, применяемых для защиты установок от токов короткого замыкания и перегрузки. В табл. 29.35 даны параметры предохранителей разборного типа ПР-2.

Для защиты полупроводниковых установок от токов короткого замыкания и перегрузок широко применяются быстродействующие плавкие предохранители. Защитные характеристики предохранителей ПНБ с наполнителем приведены на рис. 29.35. Для отдельных

Т а б л и ц а 29.34. Блоки и панели с предохранителями

Наименование	Назначение, применение	Основные параметры
Предохранители-разрядники	Защита от появления высокого потенциала при пробое изоляции	$U_{ном}$ до 500 В; пробивное напряжение от 350 до 1000 В
Рубильник-предохранитель РПП11	Неавтоматическое отключение цепей и защита от токов перегрузки и короткого замыкания	$I_{ном}=80 \div 250 \text{ А}$; $U_{ном}=500 \text{ и } 220 \text{ В}$
Предохранитель-выключатель	То же	$I_{ном}=100, 250 \text{ А}$; $U_{ном}=380 \text{ и } 220 \text{ В}$

Т а б л и ц а 29.35. Параметры предохранителей типа ПР-2, 500 В

Тип предохранителя	Номинальный ток, А	Номинальные токи плавких вставок, А	Предельный ток отключения при напряжении		Габаритные размеры, мм
			380 В	500 В	
ПР-2-15	15	6; 10; 15	8000	7000	171×24,5×33
ПР-2-60	60	15; 20; 25; 35; 45; 60	4500	3500	173×30,5×43
ПР-2-100	100	60; 80; 100	—	—	247×43×56
ПР-2-200	200	100; 125; 160; 200	11 000	10 000	296×56×76,5
ПР-2-350	350	200; 225; 260; 300; 350	13 000	11 000	346×72×10
ПР-2-600	600	350; 430; 500; 600	23 000	—	442×140×154
ПР-2-1000	1000	600; 1000; 700; 850	20 000	20 000	580×155×154

Т а б л и ц а 29.36. Технические параметры некоторых быстродействующих предохранителей

Тип	Ток, А	Напряжение, В	Интеграл квадрата тока, А ² ·с	Предельный ток отключения, кА	Относительное перенапряжение
ППД12-43133	1600	150	1100	100	1,6
ППД12-40433	6300	450	3000	200	1,8
ПП51-3340354	160	380	10	—	—
ПП41	31—630	760	1350 при 630 А	100	1,5
		440			
ПП57-31	100	До 660	1,4	—	—
ПП57	250	До 660	1,3	—	—
ПП57-37	400	До 660	140	—	—
ПП57-39	630	До 1150	300	—	—
ПП57-40	800	До 1250	—	—	—
ПП71	550—750	1300	—	40	1,5
ПП61	40—160	380	100	100	1,5

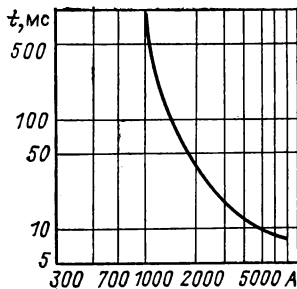
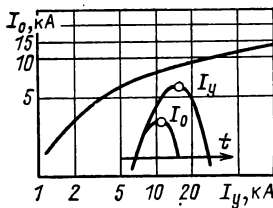
Рис. 29.36. Защитная характеристика быстродействующего предохранителя ПП51 на $I_{ном} = 400$ А

Рис. 29.37. Зависимость ограниченного тока отключения от установившегося тока короткого замыкания при отключении предохранителей ПП51

типов быстродействующих предохранителей в табл. 29.36 даны их основные технические параметры и характеристики. Для предохранителя серии ПП51 на рис. 29.36 представлена зависимость времени срабатывания от от-

ключаемого тока, а на рис. 29.37 — зависимость, характеризующая ограничение тока отключения предохранителем ПП51 при его работе.

29.7. КОМАНДОАППАРАТЫ, РУБИЛЬНИКИ, ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

К коммандоаппаратам относятся кнопки и ключи управления, путевые выключатели, контроллеры и коммандоконтроллеры и т. д. Они предназначаются для переключений оперативных цепей управления, контроллеры же могут коммутировать также силовые цепи электродвигателей. Рубильники и переключатели рассчитываются на различные номинальные токи — от небольших до высоких их значений.

В табл. 29.37 даны номинальные напряжение и токи, а также указаны особенности устройства для наиболее распространенных видов коммандоаппаратов. Основные технические параметры и области применения некоторых отечественных контроллеров представлены в табл. 29.38. Данные по отечественным выключателям и переключателям низкого напряжения содержатся в табл. 29.39.

Технические сведения по контактным путевым выключателям представлены в табл. 29.40. На рис. 29.38 изображен путевой выключатель ВПК 3000.

Технические параметры некоторых разновидностей рубильников, пакетных выключателей и переключателей-разъединителей низкого напряжения даны в табл. 29.41 и 29.42.

Т а б л и ц а 29.37. Коммандоаппараты

Вид аппарата	Серия, тип	Напряжение, В	Ток, А	Особенности устройства и назначение
Коммандоконтроллер	КП-1000	500	10	Барабанный с кулачковыми шайбами для дистанционного управления магнитными контроллерами и аппаратами крановых и металлургических приводов
Коммандоаппарат	КА21-17	380, 220	4	Кулачковый регулируемый с микропереключателями для кузнечно-прессовых машин
Коммандоаппарат	КА11	30	0,5	На магнитоуправляемых контактах (герконах) для управления металлургическими установками
Коммандоаппараты	КА410А	500	до 16	Кулачковые регулируемые для автоматизированных электроприводов
Кнопки и кнопочные посты	КУ-120	380, 220	4	Для дистанционного управления электромагнитными аппаратами
Коммандоаппараты	КА-4000	500, 400	до 15	Кулачковые регулируемые для цепей управления дистанционными или автоматизированными электроприводами (19—240 руб.)

Т а б л и ц а 29.38. Разновидности контроллеров

Серия, тип	Номинальные			Назначение, область применения
	ток, А	напряже- ние, В	мощность, кВт	
Магнитный ПСМ80	80	380	17,6	Управление трехфазными подъемными электромагнитами Крановые механизмы горизонтального передвижения и подъема То же
Магнитные К и КС	—	380	1,4—30	
Магнитные Т и ТС (реечные) ППК	— 10—63	220 380 500	45—80 —	
ККТ-60А	—	До 500	<75	Пакетно-кулачковые для ручного управления короткозамкнутыми двигателями и переключений в цепях управления электроприводом
ЭКГ-8Ж с двигательным приводом	1300	3100	—	Крановые кулачковые для управления крановыми двигателями и изменения схемы главной цепи Переключение под нагрузкой ступеней вторичной обмотки трансформаторов на электровозах

Т а б л и ц а 29.39. Выключатели и переключатели

Вид аппарата	Серия, тип	Номинальные		Назначение, область применения
		напряжение, В	ток, А	
Выключатели				
Микровыключатель	МП20	220~	4	Бытовые стиральные машины
»	МП31	12—40=	4	Цепи постоянного тока
Клавишный выключатель	ВК11	250~	6	Бытовые приборы
Выключатели реверсорные	ВРК-20	660~	160	Угольные комбайны и машины
Переключатели				
Универсальные	ППГ-64	500~	15	—
Этажные	ЭП-11УЗ	380~, 220=	1,5	Лифты
Универсальные	ПУ-11	380~	6,25	Электронагревательные приборы
Клавишные	ПК12-23	250~	10—16	Бытовые электромашины
Малогабаритные	ПМП	380~	10—30	Радиоустройства
»	ВКМ-В35	380~, 220	2,5	Цепи управления электроприводами
»	ВЗ-140	220~	0,6	Ручной электроинструмент
Многопозиционные	ПМГ	24=	0,25	—
Кулачковые универсальные	ПКУ-3	220=, 500~	10	Схемы автоматики и электропривода
Открытые	ПЕ	220=, 500~	12	Управление электромагнитными аппаратами
Пакетно-кулачковые	ПКП, ПКВ	380~	10—160	—

Т а б л и ц а 29.40. Контактные путевые выключатели

Серия	Номинальные		Износостойкость		Рабочий угол поворота; код	Примечание. Цена, руб.
	напряжение, В	ток, А	механическая	электрическая		
ВК200, ВК300	380~, 220=	6,3	5 · 10 ⁶	10 ⁶	12°	4,0
ВПК1000	380~, 220=	4	1,6 · 10 ⁶	10 ⁶	15°; 1,7 мм	4
ВПК2000А	380~, 220=	6—4	10 · 10 ⁶	2,5 · 10 ⁶	5,5—8 мм	2,0
ВПК3000	500~, 200=	6	6,3 · 10 ⁶	—	12° 6,15 мм	2—5,5
ВПК4000Д	500~, 220=	6—4	10 · 10 ⁶	2,5 · 10 ⁶	5—9 мм	123, 148
КР-6200	345~, 220=	До 5	—	—	110°	—
КР-3200	380~, 440=	15	—	—	—	Конечный выключатель
КА4800Т	500~, 440=	10	2,5 · 10 ⁶	10 ⁶	—	—
ВП-700	380~	1	—	1000	—	—
БПМ21	—	0,3—0,6	10 ⁷	10 ⁶	0,5 мм	Блоки путевых микропереключателей

Таблица 29.41. Рубильники, пакетные выключатели, переключатели-разъединители

Наименование	Тип	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А		Число полюсов	Наименование	Тип	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А		Число полюсов
			постоянный	переменный					постоянный	переменный	
Рубильники-разъединители с приводом от маховика	P2124/2	500=	800	800	2	Переключатели-разъединители с центральной рукояткой	ППЦ-24	380~ 220=	400	400	2
	P234/2		1500	1500	2		ППЦ-26		600	600	2
	P2523/2		300	2500	2		ППЦ-31		100	100	3
	P2723/2		5000	4000	2		ППЦ-32		250	250	3
	P2126/2		800	800	3		ППЦ-34		400	400	3
	P2326/2		1500	1500	3		ППЦ-36		600	600	3
Пакетные выключатели	P2525/2	220=	3000	2500	3	Переключатели-разъединители с центральной рукояткой	P2111/2	380~ 220=	800	800	1
	P2725/2		5000	4000	3		P2511/2		1500	1500	1
	PВМ1-10	380~	6,3	4	1		P2711/2		3000	2500	1
	PВМ2-10		10	6,3	2		P2113/2		500	4000	1
	PВМ2-25		25	16	2		P2133/2		800	800	2
	PВМ2-60		60	40	2		P2313/2		1500	1500	2
	PВМ2-100		100	63	2		P2513/2		3000	2500	2
	PВМ2-150		250	160	2		P2713/2		5000	4000	2
	PВМ2-400		400	250	2		P2115/2		800	800	3
	PВМ3-10		10	6,3	3		P2315/2		1500	1500	3
	PВМ3-25		25	16	3		P2515/2		3000	2500	3
	PВМ3-100		100	63	3		P2541/2		3000	2500	1
	PВМ3-60		63	40	3		P2741/2		5000	4000	1
Переключатели-разъединители с центральной рукояткой	PВМ3-250	380~	250	160	3		P2543/2		3000	2500	2
	PВМ3-400		400	250	3		P2743/2		5000	4000	2
	P11		100	100	1		P2545/2		3000	2500	3
	P12		250	250	1		P2745/2		5000	4000	3
	P16		600	600	1		P2124/2		800	800	2
	P21		100	100	2		P2324/2		1500	1500	2
	P22		250	250	2		P2123/2		800	800	2
	P24		400	400	2		P2323/2		1500	1500	2
	P31		100	100	3		P2523/2		3000	2500	2
	P32		250	250	3		P2723/2		5000	4000	2
То же с центральным рычажным приводом	P34		400	400	3		P2126/2		800	800	3
	ППЦ-21		100	100	2		P2326/2		1500	1500	3
	ППЦ-22		250	250	2		P2525/2		3000	2500	3
	...		...	...	...		P2725/2		5000	4000	3

Таблица 29.42. Неавтоматические пакетные выключатели

Номинальный ток, А	Наибольшие отключаемые токи, А, при напряжении, В		Количество переключений переменный ток при $\cos \varphi = 0,3$ или постоянный при $L/R = 0,01$ с
	постоянным 220	переменным 380	
10	10	6	10 000
25	25	15	10 000
60	60	40	10 000
100	100	60	5000
150	150	100	5000
250	250	150	5000
400	400	250	5000

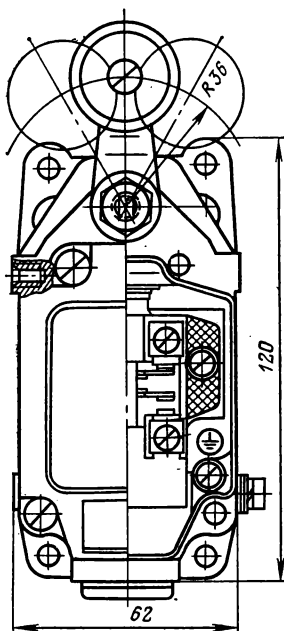


Рис. 29.38. Путевой выключатель ВПК3000

29.8. БЕСКОНТАКТНЫЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

Магнитные усилители

Классификация и параметры. Магнитные усилители (МУ) подразделяются на простые (по рабочим обмоткам МУ протекает переменный ток) и усилители с самонасыщением (по рабочим обмоткам протекает однополупериодный и однополярный импульсный ток, т. е. ток, содержащий постоянную составляющую). Реверсивные МУ осуществляют изменение относительной полярности на нагрузке с помощью

изменения направления тока в обмотке управления. Быстродействующие с самонасыщением усилители при скачкообразном изменении входного сигнала обеспечивают в первый же управляющий полупериод установившееся значение индукции управления; в результате их инерционность является минимально возможной для МУ и характеризуется продолжительностью полупериода частоты напряжения питания МУ.

Характеристика управления МУ — это взаимосвязь между установившимися значениями входной и выходной величин, например между рабочим током (нагрузкой) и током управления.

Коэффициенты усиления (средние):

а) напряжения $k_u = \Delta U_p / \Delta U_y$;

б) тока $k_i = \Delta I_p / \Delta I_y$, где ΔU_p (ΔI_p) — приращения выходного сигнала по рабочему напряжению (току), соответствующие выбранному диапазону изменения входного сигнала; ΔU_y (ΔI_y) — напряжение (ток) управления;

в) мощности

$$k_p = \frac{\Delta P_p}{\Delta P_y} = k_i^2 \frac{R_{нр}}{R_y} = k_u^2 \frac{R_y}{R_{нр}},$$

где ΔP_p и ΔP_y — приращения полезной мощности выходного сигнала и сигнала управления; $R_{нр}$ и R_y — сопротивления нагрузки и цепи управления.

Для МУ с нагрузкой на переменном токе вместо сопротивления $R_{нр}$ берется полное сопротивление нагрузки при частоте первой гармоники. Тогда

$$k_p = (\Delta I_{p1} / \Delta I_y)^2 z_{н1} / R_y,$$

где ΔI_{p1} — приращение рабочего тока МУ (по первой гармонике).

Расчет магнитных усилителей. Расчету предшествует выбор схемы МУ, материала и формы магнитопровода. На рис. 29.39 представлено несколько характерных схем МУ. Обозначено: ω_p и ω_y — обмотки рабочей и управления, $R_{нр}$ и R_y — сопротивления нагрузки и управления, $U_{\sim}$ и $U_{=}$ — напряжения питания рабочей цепи (переменный ток) и цепи управления (постоянный ток). Условные начала обмоток отмечаются на схемах точками. Выбор схемы МУ определяется характером и родом тока нагрузки, параметрами характеристики управления, коэффициентами усиления, динамическими параметрами. Материал магнитопровода влияет на размеры МУ и его характеристику управления. Толщина магнитного материала определяется частотой источника питания; уменьшение ее снижает вихревые токи в магнитопроводе и исключает возможность чрезмерного расширения динамической петли гистерезиса.

Форма магнитопровода во многом определяется мощностью МУ. Примерные пределы мощности таковы:

а) витые ленточные из пермаллоев и холоднокатаной стали — от долей ватта до 2000 Вт;

б) Ш-образные из горячекатаной стали — от 5 до 2000 Вт;

в) ленточные разрезные броневого типа из холоднокатаной стали — от 2 до 3000 Вт;

г) ленточные разрезные стержневого типа из холоднокатаной стали — от 4 до 8000 Вт;

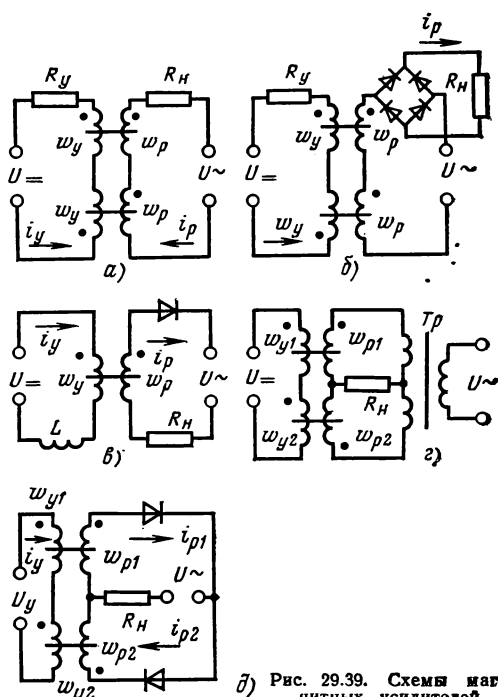


Рис. 29.39. Схемы магнитных усилителей

д) шихтованные П-образные из холоднокатаной стали — от 100 до 7000 Вт.

Исходные данные для расчета МУ: а) рабочий ток (ток нагрузки) в номинальном режиме $I_{ном}$; б) напряжение на нагрузке в номинальном режиме $U_{ном}$; в) полный ток управления $I_{y,ном}$; г) полная мощность управления P_y ; д) постоянная времени τ_y усилителя.

Порядок расчета МУ следующий.

1. Определяется коэффициент β , характеризующий, какая часть напряжения питания «передается» сопротивлению нагрузки (при КПД $\eta = 1$):

$$\beta = 1 - \Delta B_{ном} / 2B_{max}.$$

Перепад индукции $\Delta B_{ном}$ в магнитопроводах за полупериод напряжения в номинальном режиме и максимальная индукция B_{max} определяются по динамическим кривым размагничивания магнитопровода (рис. 29.40).

2. Расчетное значение геометрического фактора из условия допустимого нагрева определяется по формулам:

а) для МУ без самонасыщения

$$G_{му} = \frac{P_{ном}}{2\sqrt{2}\pi\eta k_c f \beta B_m} \times \sqrt{\frac{\rho_n}{k_t \Theta_d} \left[\frac{\lambda_p}{\alpha_p k_{м,р}} + \frac{\lambda_y}{(1 - \alpha_p) k_{м,у} \beta^2} \right]},$$

где $P_{ном}$ — мощность нагрузки в режиме номинальной отдачи, Вт (определяется по действующим значениям тока и напряжения); η — КПД (определяется как отношение сопротивления нагрузки к сумме всех сопротивлений нагрузочной цепи); зависимости $\eta = f(P_n)$ даны на рис. 29.41; ρ_n — удельное сопротивление ма-

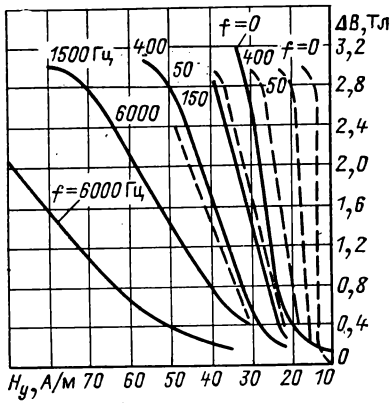


Рис. 29.40. Динамические кривые размагничивания торондальных магнитопроводов из электротехнической стали 3413 0,08 мм (сплошные линии) и пермаллоя 50 НП 0,05 мм (пунктир) на разных частотах f

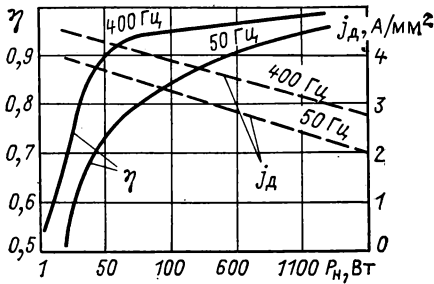


Рис. 29.41. Зависимости КПД η и допустимой плотности тока от номинальной мощности МУ

териала катушки в нагретом состоянии, Ом·м (в предварительных расчетах для медного провода $\rho_n \approx 2,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м); λ_p и λ_y — средние относительные длины витков рабочей обмотки и обмотки управления, определяемые как отношения средней длины витка соответствующей обмотки к длине среднего витка всей намотки (если рабочая обмотка занимает половину площади обмоточного окна, то $\lambda_p = 0,75$ и $\lambda_y = 1,25$ для МУ с раздельными обмотками управления); a_p — относительная площадь обмоточного окна, занимаемого рабочей обмоткой, т. е. отношение площади окна, занимаемого этой обмоткой, к полной площади окна (в первом приближении $a_p = 0,45$); k_T — коэффициент теплопередачи от катушек, Вт/(м²·°С) (его зависимость от внутреннего диаметра D_v , м, торондального сердечника выражается так: $k_T \approx 5 + 1,5/D_v$); Θ_d — допустимое превышение температуры обмоток, °С, выбираемое по классу нагревостойкости изоляции (в приближенных расчетах $\Theta_d \approx 50$ °С); $k_{м.р}$ и $k_{м.у}$ — коэффициенты заполнения обмоточного пространства по меди рабочей обмотки и обмотки управления; обычно $k_{м.р} \approx 0,45 + 0,55$; k_c — коэффициент заполнения по стали (для ленточных сердечников $k_c \approx 0,7 + 0,9$, для шихтованных $k_c \approx 0,6 + 0,95$); единицы других величин: $\Gamma_{му}$ — м^{7/2}, B_{max} — Тл, f — Гц;

б) для усилителя с самонасыщением

$$\Gamma_{мус} = \frac{P_{ном}}{2\pi k_c f B_{max}} \sqrt{\frac{\rho_n}{k_m k_c \Theta_d}}.$$

Это выражение получено при условии, что в МУ с самонасыщением (МУС) МДС рабочей обмотки значительно превышает МДС обмотки управления и обмоточное окно занято в основном рабочей обмоткой, к которой и относится коэффициент k_m .

3. По рассчитанному геометрическому фактору $\Gamma_{расч}$ выбирается типовой магнитопровод с геометрическим фактором $\Gamma_{тип}$, близким к расчетному, так, чтобы выполнялось условие $\Gamma_{тип} \geq \Gamma_{расч}$.

4. По найденным в п. 3 параметрам магнитопровода определяются усредненные значения резистивного сопротивления рабочих обмоток, удовлетворяющие условиям допустимого нагрева:

МУ с общей обмоткой управления (ОУ)

$$R_p = \frac{k_T S_{O2} \Theta_d}{2 I_{ном}^2};$$

МУ с раздельной ОУ

$$R_p = \frac{k_T S_{O1} \Theta_d}{I_{ном}^2};$$

МУ с самонасыщением с общей ОУ

$$R_p = \frac{k_T S_{O2} \Theta_d}{I_{ном}^2};$$

МУ с самонасыщением с раздельной ОУ

$$R_p = \frac{2k_T S_{O1} \Theta_d}{I_{ном}^2},$$

где $I_{ном}$ — действующее значение тока нагрузки МУ в режиме номинальной отдачи; S_{O1} , S_{O2} — площади поверхности охлаждения при раздельной и общей обмотках управления.

5. Определяется η без учета потерь в диодах:

МУ без самонасыщения

$$\eta = R_n / (R_n + 2R_p);$$

МУ с самонасыщением

$$\eta = R_n / (R_n + R_p);$$

где R_n и R_p — сопротивления нагрузки и рабочей обмотки.

6. Напряжение питания МУ

$$U_d = U_{ном,д} / \beta \eta,$$

где $U_{ном,д}$ — номинальное напряжение источника (действующее значение), В.

7. По среднему значению номинального рабочего тока МУС выбираются диоды, включаемые в рабочую цепь. Обратные напряжения диодов:

в трансформаторной схеме

$$U_{обр} = k_3 \cdot 2 \sqrt{2} U_d;$$

в мостовой схеме

$$U_{обр} = k_3 \sqrt{2} U_d;$$

где коэффициент запаса $k_3 = 1,2 \div 1,5$.

8. Число витков рабочей обмотки:
МУ без самонасыщения

$$w_p = U_d / 8k_\Phi f S_c k_c B_{max};$$

где S_c — геометрическое сечение магнитопровода;

МУ с самонасыщением

$$w_p = U_d / 4f S_c k_c B_{max};$$

где коэффициент формы кривой тока

$$k_\Phi = \pi/2 \sqrt{2}.$$

9. Диаметр провода рабочей обмотки

$$d_p = 2 \sqrt{\rho_n l_p w_p / \pi R_p}.$$

Все данные позволяют проверить размещение рабочих обмоток на магнитопроводе и определить запас площади обмоточного окна для обмоток управления, смещения и обратной связи. Уточняются параметры рабочей обмотки, КПД (с учетом потерь в диодах), U_d , w_p и d_p .

10. Характеристика управления простого МУ $I_p = f(I_y)$ рассчитывается по формулам:

а) максимальный рабочий ток

$$I_{pmax} = U / R_\Sigma;$$

где R_Σ — суммарное активное сопротивление рабочей цепи; U — напряжение на рабочей обмотке МУ;

б) минимальный ток (холостого хода)

$$I_{p0} = 2H_0 l_c / w_p,$$

где H_0 определяется по основной кривой намагничивания материала для индукции

$$B_0 = U / 8f w_p S_c;$$

в) МДС в зоне между токами I_{pmax} и I_{p0}

$$I_p w_p = I_y w_y.$$

Характеристика управления МУ с самонасыщением $U_H = f(H_y)$ рассчитывается по формуле

$$U_H = \eta (U_d - 2f w_p S_c \Delta B),$$

где U_H — напряжение на нагрузке.

Значение ΔB для разных напряженностей поля управления H_y определяется по динамическим кривым размагничивания (см. рис. 29.40).

На рис. 26.42 дан типичный вид характеристик управления для простого МУ и МУС. Точки А и В на рис. 29.42, б соответствуют отрезку линейного участка кривой

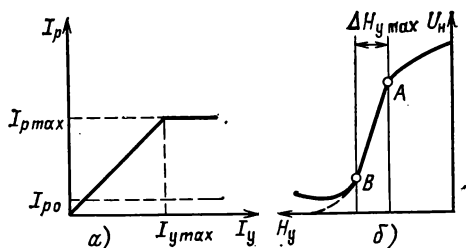


Рис. 29.42. Типичные характеристики управления простого МУ (а) и МУС (б)

размагничивания материала магнитопровода.

11. Число витков простого МУ

$$w_y = I_{ном} w_p / I_{y,ном};$$

МУ с самонасыщением

$$w_y = \sigma \Delta H_{ymax} l_c / I_{y,ном};$$

где $I_{y,ном}$ — ток управления при номинальном рабочем токе; $\sigma \approx 1,5$ — коэффициент запаса по сигналу управления; $H_{y,max}$ определяется по характеристике управления МУС, ток управления $I_{y,ном}$ в номинальном режиме задается в исходных данных.

При известном w_y характеристика управления МУС может быть построена в функции тока управления $U_H = f(I_y)$.

12. Диаметр d_y провода обмотки управления зависит от ее сопротивления R_y , которое выбирается из условия обеспечения необходимости коэффициента усиления мощности k_p :

$$R_y = P_{ном} / k_p I_{y,ном}^2;$$

$$d_y = 2 \sqrt{\frac{\rho_n l_n w_y}{\pi R_y}}.$$

Диаметр провода надо брать не менее 0,1 мм. При необходимости в цепь управления включается добавочное сопротивление.

13. Параметры обмотки смещения выбираются произвольно. Требуемая напряженность поля $H_{см}$ от этой обмотки определяется заданной степенью смещения характеристики управления на графике. Целесообразно, чтобы ток смещения превышал ток утечки выпрямителей цепи смещения, напряжение этой цепи не было меньше 5—10 В, а суммарная мощность была в 5—10 раз меньше $P_{ном}$. Чтобы постоянная времени цепи смещения была небольшой в сравнении с постоянной времени цепи управления, должно соблюдаться неравенство

$$w_{см}^2 / R_{см} \ll w_y^2 / R_y,$$

где $w_{см}$ и $R_{см}$ — число витков обмотки смещения и сопротивления цепи смещения.

14. Постоянная времени цепи управления простого МУ

$$\vartheta_y = k_p / 4\eta;$$

МУ с самоподмагничиванием

$$\vartheta_y = w_y^2 S_c \mu_{ay} / l_c R_y,$$

где $\mu_{ay} = \Delta B / \Delta H$ — динамическая абсолютная магнитная проницаемость, определяемая из кривых рис. 29.40.

Промышленные образцы МУ — однофазные серий УСО, УСОЭ, УСОА предназначаются для плавного бесконтактного регулирования тока и напряжения силовых электроустановок, электроприводов и других устройств; выходные МУ серии ВУМ — для усиления маломощных сигналов, поступающих от магнитных логических элементов в бесконтактных схемах автоматического управления; серии ТУМ — в качестве входных усилителей, обеспечивающих усиление и суммирование нескольких управляющих сигналов.

Полупроводниковые усилители и реле

Принципиальная электрическая схема двухкаскадного усилителя с общим эмиттером приведена на рис. 29.43. На рис. 29.44 дана схема усилителя с обратной связью по напряжению (коллекторной), а на рис. 29.45 — с обратной связью по току (эмиттерной). Обратная связь в схемах по рис. 29.44 и 29.45, осуществляемая введением ветви с $R_{0,к}$ и $R_{0,э}$, изменяет характеристики усилителей.

Условие существования релейного режима: для усилителей по рис. 29.44

$$R_{0,к} < \beta_1 \beta_2 \frac{R_H R_Y}{(R_Y + r_{эб1})} \frac{R_{к1}}{(R_{к1} + R_1)};$$

для усилителей по рис. 29.45

$$R_{0,э} > \frac{R_Y + r_{эб1}}{\beta_1 \beta_2} \frac{R_{к1} + R_1}{R_{к1}},$$

где β_1, β_2 — коэффициенты усиления VT_1 и VT_2 ; $r_{эб1}$ — входное сопротивление VT_1 .

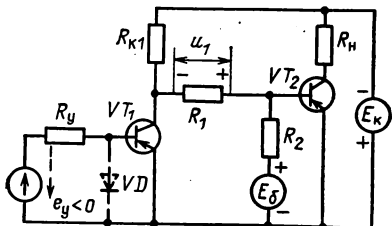


Рис. 29.43. Схема двухкаскадного усилителя с общим эмиттером

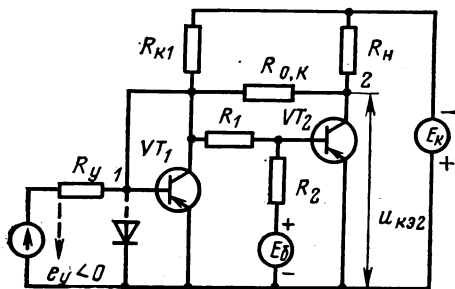


Рис. 29.44. Схема усилителя с обратной связью по напряжению

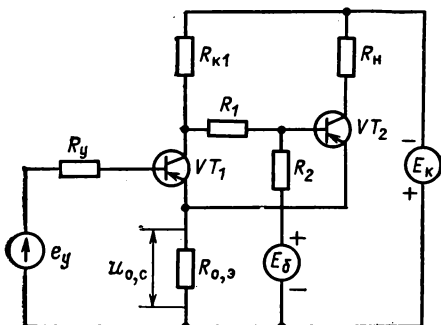


Рис. 29.45. Схема усилителя с обратной связью по току

Для получения релейного режима в усилителе с обратной связью по напряжению в качестве входного сигнала предпочтительно применять источник тока, а в усилителе с обратной связью по току — источник напряжения.

Расчет полупроводниковых реле. При расчете полупроводниковых реле обычно бывают заданы номинальная мощность $P_{ном}$ в нагрузке, сопротивление нагрузки R_H (или напряжение U_H и ток I_H в нагрузке), мощность $P_{у,п}$, напряжение $e_{у,п}$, переключения и коэффициент возврата k_v . Требуется определить напряжения питания E_K и E_6 , сопротивления межкаскадной и обратной связей и смещения, выбрать транзисторы.

Порядок расчета следующий.

1. Выбирается напряжение питания:

для усилителя по рис. 29.43 (в предположении, что падение напряжения на насыщенном транзисторе значительно меньше напряжения питания)

$$E_K \approx U_H;$$

для реле с коллекторной обратной связью

$$E_K = U_H + U_{кэ,н2};$$

для реле с эмиттерной обратной связью

$$E_K \approx U_H + U_{кэ,н2} + I_H R_{0,э} (1 + k_n / \beta_2);$$

где $U_{кэ,н2}$ — падение напряжения на насыщенном VT_2 ; k_n — коэффициент насыщения.

2. Выбирается выходной транзистор по наибольшему возможному величинам тока коллектора $I_{к,н} \approx E_K / R_H$ при насыщении транзистора и напряжении на коллекторе при отсечке $U_{к,о} \approx E_K$; при этом по напряжению предусматривается запас в 1,5—2 раза, т. е. $U_{к,доп} \approx (1,5 + 2) U_{к,о}$, где $U_{к,доп}$ — допустимое обратное напряжение на коллекторе. С выбором VT_2 определяют и обратный ток коллектора $I_{к,о2}$, рассчитывают ток базы VT_2 на границе насыщения $I_{б,н2} \approx k_n / \beta_2 R_H$.

3. Выбирается напряжение базового смещения $E_6 \geq 2 + 3$ В.

Если $E_6 < E_K$, то рекомендуется выбрать $E_6 \geq 2 + 3$ В.

4. Расчет сопротивлений межкаскадной связи. Падение напряжения на R_1 :

$$U_1 \geq U_{кэ,н1} + U_{б,о2},$$

где $U_{кэ,н1}$ — падение напряжения на насыщенном VT_1 ; $U_{б,о2}$ — напряжение отсечки VT_2 (приближенно можно принять $U_{кэ,н1} = 0,3 + 0,5$ В, $U_{б,о2} = 0,1 + 0,3$ В). Рассчитываются R_1 и $R_{к1}$ по формулам:

$$R_1 = \frac{(1 - \sqrt{U_1 / E_K}) \sqrt{E_K U_1}}{k_n I_{б,н2} + E_6 / R_2};$$

$$R_{к1} < \frac{E_K}{k_n I_{б,н2} + E_6 / R_2};$$

где $k_n \approx 1,2 + 2,0$, а R_2 определяется из условия отсечки VT_2 :

$$R_2 < \frac{E_6}{I_{к,о2} + I_{имин}};$$

ток $I_{имин}$ определяется по необходимому для отсечки напряжению U_1 и R_1 .

5. Выбирается VT_1 по наибольшему току коллектора $I_{к,н1} \approx k_n / R_H$ и по наибольшему на-

пряжению на коллекторе $U_{к1max} \approx U_{к01}$. По справочным данным определяются зависимость коэффициента усиления VT_1 от коллекторного тока $\beta_1 = \beta_1(i_{к1})$, зависимость напряжения база — эмиттер от $i_{к1}$ на границе насыщения $u_{эб1} = u_{эб1}(i_{к1})$ $u_{к1} = 0$.

6. Проверяется режим отсечки VT_2 и определяется R_y :

$$R_y \approx e_{y,п}^2 / P_{y,п} (\text{при } e_{y,п} > 1 \text{ В}),$$

где $e_{y,п}$, $P_{y,п}$ — напряжение и мощность переключения, В и Вт. При $R_y > R_n$ выбирается коллекторная, а при $R_y < R_n$ — эмиттерная обратная связь.

7. Определяются напряжения срабатывания и отпускания, сопротивление обратной связи.

8. Рассчитывается цепь смещения, которая дает возможность получать требуемые напряжения срабатывания $e_{y,сраб}^{см}$ и $e_{y,отп}^{см}$ реле:

$$e_{y,сраб}^{см} = \frac{e_{y,п}}{1 - k_n},$$

где $k_n = e_{y,отп}^{см} / e_{y,сраб}^{см} < 1$ для нормально включенного и $k_n > 1$ — для нормально отключенного реле. Перемещение характеристики $\Delta e_{см} = e_{y,сраб}^{см} - e_{y,отп}^{см}$. Сопротивление смещения

$$R_{см} \approx R_y E_{см} / \Delta e_{см},$$

где $E_{см} = E_k$ при $\Delta e_{см} < 0$ и $E_{см} = E_b$ при $\Delta e_{см} > 0$.

9. Проводится проверка теплового режима транзисторов и их выбор.

10. Определяются статические и динамические параметры реле и проводится построение характеристики управления.

Бесконтактные устройства для управления электроприводами

Переключатели тиристорные маломощные серии ПТМ предназначены для включения, реверса, отключения, динамического торможения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором мощностью до 5 кВт, для бесконтактного управления электромагнитами и другими нагрузками постоянного и переменного тока. Основные технические параметры ПТМ: время включения не более 10 мс, время отключения не более 15 мс при работе на активную нагрузку (для ПТМ переменного тока частотой 50 Гц); параметры нагрузки — переменный ток 1,6, 3 и 10 А, до 440 В, 50, 60 и 400 Гц, постоянный ток 3 А, 24—48 и 110—220 В. Для обеспечения блокировки режимов и защиты симисторов при переключении режимов и для усиления входного сигнала предусмотрена согласующая приставка П. Размеры ПТМ — 90×55×57 мм (90×55×78 мм — ПТМ-1). Цена от 42 до 82 руб.

Пускорегулирующие бесконтактные устройства серии ПРБУ применяются для пуска, реверса, торможения и бесступенчатого регулирования скорости асинхронных электродвигателей серий АҚ, МТ, МТВ, МТМ мощностью до 100 кВт.

Пусковые тиристорные устройства серии ПТУ предназначены для включения и отклю-

чения трехфазных асинхронных двигателей, активных и активно-индуктивных нагрузок. Номинальный ток 63, 100, 160 и 250 А.

Станции управления типов БУ, ШУ предназначены для управления электродвигателями постоянного тока мощностью от 5,75 до 160 кВт.

Станции управления типа ТСУ предназначены для управления асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором мощностью до 40 кВт.

Стабилизаторы

Электромагнитные стабилизаторы напряжения и тока по принципу действия делятся на параметрические (стабилизация осуществляется путем использования некоторых свойств нелинейных резисторов — бареттеров, насыщающихся реакторов и т. п.) и компенсационные (стабилизация осуществляется автоматическим регулированием выходного напряжения по принципу отклонения). Среди электромагнитных стабилизаторов наиболее распространены феррорезонансные. Основные схемы замещения стабилизатора напряжения с феррорезонансом токов и напряжений даны на рис. 29.46, принципиально-конструктивные схемы стабилизаторов, соответствующие схемам замещения по рис. 29.46, приведены на рис. 29.47.

Элементы расчета. Для стабилизатора переменного напряжения, выполненного по схеме

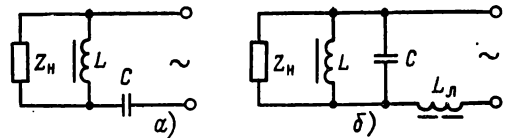


Рис. 29.46. Схемы замещения стабилизатора напряжения с феррорезонансом токов (а) и напряжений (б)

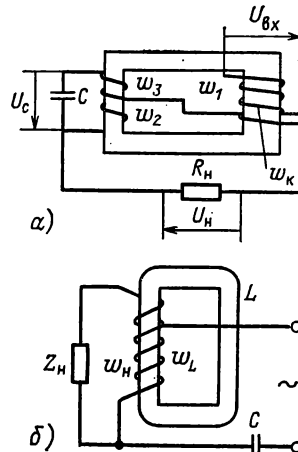


Рис. 29.47. Принципиально-конструктивная схема стабилизатора напряжения с феррорезонансом токов (а) и напряжений (б):

w_H , $w_2 + w_3$, w_K — обмотки нагрузочная, емкостная и компенсационная

рис. 29.47 и предназначенного для работы в сети 50 Гц, приближенный расчет проводится для заданного среднего значения входного напряжения. Ненасыщенный стержень (большее сечения) рассчитывается на магнитную индукцию 0,8—1,0 Тл, насыщенный (меньшего сечения) — на магнитную индукцию насыщения 1,6—1,8 Тл. Сечение ненасыщенного стержня $S_{ст1} \approx 1,1 \sqrt{P_{ном}}$, см², сечение насыщенного стержня $S_{ст2} \approx (0,5 \div 0,7) \sqrt{P_{ном}}$, см², где $P_{ном}$ — номинальная мощность, потребляемая нагрузкой, В·А.

Из расчета максимальной индукции 1 Тл выбирается число вольт на один виток первичной обмотки $e_0 = 0,022 S_{ст}$; определяются числа витков обмоток:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= U_{вх}/e_0; \\ \omega_2 &= 1,43 U_{вх}/e_0; \\ \omega_k &= (0,15 \div 0,3) \omega_2; \\ \omega_3 &= (U_C/e_0) - \omega_2, \end{aligned}$$

где $U_{вх} = (U_{вх max} + U_{вх min})/2$ — стабилизированное напряжение на нагрузке; U_C — максимальное рабочее напряжение конденсатора, которое определяется числами витков обмоток ω_3 и ω_2 с учетом допустимого рабочего напряжения U_p конденсатора (приблизительно $U_C \approx 0,65 U_p$). Емкость конденсатора $C = 1300 P_{ном}/U_C^2$, мкФ. Токи в обмотках приближенно оцениваются по формулам

$$\begin{aligned} I_1 &= 2 P_{ном}/U_{вх}; \quad I_3 = 1,5 P_{ном} U_H; \\ I_k &= I_H = P_{ном} U_H; \quad I_2 = \sqrt{I_k^2 + I_3^2}. \end{aligned}$$

Исходя из плотности тока в обмотке на насыщенном стержне ($J \approx 1,5$ А/мм²) и на ненасыщенном ($J \approx 2,0$ А/мм²) рассчитывается диаметр провода, мм, по формуле

$$d = \sqrt{4 I / (\pi J)},$$

где I — ток в каждой обмотке, А.

Электромагнитные стабилизаторы напряжения типа С выпускаются на номинальные токи нагрузки от 0,71 до 4,1 А при номинальной мощности от 0,09 до 0,9 кВ·А и стабилизированном напряжении 127 ± 3 В или 220 ± 5 В (при изменении напряжения сети от +8 до —17 % номинального).

Стабилизаторы серии 701МП предназначены для питания схем на полупроводниковых приборах при токе нагрузки от 50 до 100 мА, а при подключении внешнего транзистора — при токе до 1 А.

Полупроводниковый стабилизатор серии СП рассчитан на работу от сети трехфазного переменного тока 400 Гц, является стабилизированным выпрямителем компенсационного типа с усилителем обратной связи и последовательным включением регулирующего элемента и входит в состав источника питания постоянного тока типа Б5. Например, Б5-13 обеспечивает стабилизацию выходного напряжения 100 ± 3 В с питанием от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В, 50 и 60 Гц либо от сети 220 ± 11 В, 400 Гц; предельно допустимый ток нагрузки 0,5 А.

29.9. ДАТЧИКИ

Датчик (первичный измерительный преобразователь) — устройство, воспринимающее контролируемую величину с последующим преобразованием ее в величину, удобную для последующих систем измерения и автоматики. По характеру входной величины, воспринимаемой и преобразуемой датчиком, различаются датчики перемещения, угла поворота, силы, момента вращения, размеров, уровня, скорости, ускорения, параметров вибраций, давления, расхода, температуры и т. п. Условная классификация датчиков по принципу действия: индуктивные, индукционные, трансформаторные, емкостные, реостатные, пьезоэлектрические, полупроводниковые (пневматические, гидравлические, радиационные, акустические, термические и магнитомодуляционные здесь не рассматриваются).

Индуктивные датчики

Принцип действия основан на измерении индуктивности системы датчика под воздействием входной величины. В общем случае индуктивность электромагнитной системы равна:

$$L = \frac{1}{I} \sum \Phi_i \omega_i,$$

где $\sum \Phi_i \omega_i$ — потокосцепление системы; I — обуславливающий потокосцепление ток, А. Для системы с обмоткой и сердечником с небольшим зазором без учета рассеяния магнитного потока индуктивность

$$L = \omega^2 / Z_m,$$

где полное магнитное сопротивление Z_m сердечника и зазора равно:

$$Z_m = \sqrt{(R_{ст} + R_6)^2 + X_{ст}^2},$$

здесь $R_{ст}$, R_6 , $X_{ст}$ — соответственно активное сопротивление воздушного зазора, реактивная составляющая сопротивления магнитопровода.

В датчиках положения с переменным реактивным магнитным сопротивлением в качестве подвижных элементов, изменяющих индуктивность систем, применяются короткозамкнутые обмотки, перемещаемые вдоль магнитопровода, и электропроводящие пластины, вводимые в зазор магнитопровода или располагающиеся вблизи плоской катушки.

Магнитное сопротивление, вносимое короткозамкнутой обмоткой,

$$X_m = \omega \omega_k^2 / r_k,$$

где ω_k , r_k — число витков и сопротивление катушки, Ом; ω — рабочая угловая частота датчика (обычно применяются высокие частоты), рад/с.

Комплексное магнитное сопротивление электропроводящей круглой пластины радиусом r и толщиной Δ равно:

$$Z = \frac{\Delta}{\mu_a S} (A_m + j B_m).$$

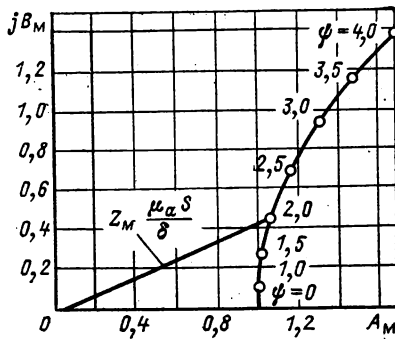


Рис. 29.48. Зависимость A_M и B_M в комплексной плоскости от безразмерного параметра $\psi = \sqrt{2r/\Delta_\pi}$

Зависимость A_M и B_M в комплексной плоскости от безразмерного параметра $\psi = \sqrt{2r/\Delta_\pi}$, где Δ_π — глубина проникновения магнитного потока в пластину, дана на рис. 29.48.

Некоторые разновидности индуктивных датчиков:

1. ИКВ. Исполнения датчиков этой серии указаны в табл. 29.43. Принципиальная схема включения датчика типа ИКВ-22 дана на рис. 29.49. Построен на принципе преобразования

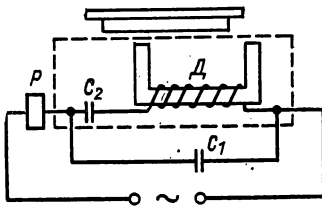


Рис. 29.49. Схема включения датчика типа ИКВ-22

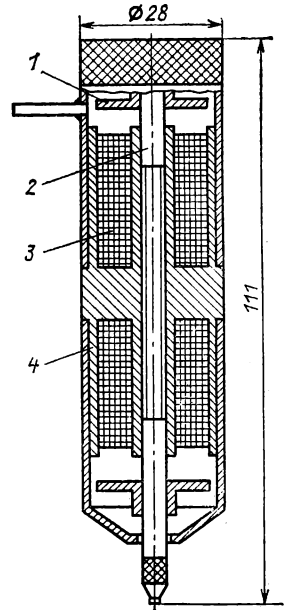
линейного перемещения движущегося объекта в изменении индуктивного сопротивления катушки датчика со стальным сердечником. Датчики ИКВ-30 применяются по два и включа-

Таблица 29.43. Датчики положения серии ИКВ

Технические Данные	Тип датчика		
	ИКВ-100	ИКВ-22 (ИКВ-22Т)	ИКВ-30
Переменное напряжение питания, В	127	24	127
Полное сопротивление катушки датчика без якоря Z_{min} , Ом	295	—	40
Полное сопротивление катушки датчика с якорем Z_{max} , Ом	570	—	68
Отношение Z_{max}/Z_{min}	1,93—1,44	—	1,7
Воздушный зазор между магнитопроводом и якорем, мм	5—30	6,4	6,5

Рис. 29.50. Датчик типа БВ-844:

1 — подвижные диски магнитной системы; 2 — измерительный стержень; 3 и 4 — обмотки датчика, включенные по дифференциальной схеме



ются в схемы, где изменение управляющего сигнала определяется направлением движения.

2. Э. Датчик перемещений применяется в качестве выходного преобразователя в дистанционных манометрах, работающих в комплексе с вторичными индуктивными приборами типа Э, напряжение питания 127 В, 50 Гц, ход сердечника в рабочем диапазоне 30,5 мм.

3. БВ. Датчики размеров типов БВ-908 и БВ-844 работают в комплексе с записывающим устройством типа БВ-662 и предназначены для контроля размеров деталей в машиностроении. Разрез датчика БВ-844 дан на рис. 29.50.

4. Датчики углового перемещения применяются в гидроскопических устройствах для измерения угла прецессии и исполняются однокоординатными типа ОДУ и двухкоординатными типа ДДУ. Исполнения датчика даны в табл. 29.44.

Таблица 29.44. Датчики углового перемещения серии ДУ

Технические данные	Тип датчика		
	ОДУ-60	ОДУ-60а	ДДУ-90
Рабочий диапазон перемещений	2,5°	2,5°	2,0°
Максимальный диапазон перемещений	6°	6°	6°
Чувствительность (при нагрузке 10 кОм), В°	0,5—0,05	0,5—0,05	0,5
Нулевое остаточное напряжение, В	0,033	0,002	0,01
Реактивный момент, 10^{-6} Н·м	4	4	5
Напряжение питания, В	40	9; 7	40
Частота, Гц	500	500; 1000	500
Статическая характеристика в пределах рабочего диапазона регулирования	Линейная, с точностью 3 %		

Трансформаторные датчики

Общий принцип действия — входное перемещение изменяет индуктивную связь между двумя системами обмоток, одна из которых питается переменным током, а с другой снимается выходной сигнал. Обе обмотки датчиков взаимозаменяемы. Выходное напряжение датчиков, принцип действия которых основан на перераспределении магнитных потоков или напряжений при перемещении якоря, определяется по формуле

$$U_2 = U_1 \frac{w_1}{w_2} \frac{G' - G''}{G' + G''},$$

где w_1, w_2 — число витков обмоток; G', G'' — проводимости зазоров, изменяющихся при перемещении якоря.

В датчиках электромагнитного исполнения выходное напряжение, В,

$$U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1} \sin \alpha,$$

где w_1, w_2 — число витков обмоток статора и ротора; α — угол поворота ротора (угол между электрическими осями обмоток). В качестве примера ферродинамический датчик угла поворота (ЭДУ) применяется совместно с вторичными приборами ВФ компенсационного типа. Серия имеет следующие технические параметры: рабочий угол поворота рамки от среднего положения 20° , потребляемая мощность 6,0 Вт, максимальный момент, необходимый для поворота рамки на полный угол, 10^{-5} Н·м.

Резистивные датчики

Материал проволоки, используемой для намотки резистивных датчиков, указан в табл. 29.45.

Характеристика линейного датчика

$$R_x = \frac{R}{L} x,$$

где R — сопротивление датчика, Ом; L — полная длина намотки, м; x — перемещение щетки, м. Для получения нелинейных характеристик $R_x = f(x)$ используются фигурные каркасы, изображенные на рис. 29.51.

Для датчика по рис. 29.51, а форма фигурного каркаса $h = \varphi(x)$ для обеспечения заданной характеристики $R = f(x)$ определяется по формуле

$$h = \frac{q}{2\rho w_0} \frac{df(x)}{dx} - b,$$

Т а б л и ц а 29.45. Материал проволоки для намотки резистивных датчиков

Название	Состав	Удельное сопротивление, мкОм·м	Температурный коэффициент $10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$		Максимальная рабочая температура, $^\circ\text{C}$
			сопротивления	удлинения	
Константан	60 % Cu, 48 % Ni	0,480	$-20 \div +20$	15,2	500
Нихром	60 % Ni, 15 % Cr	1,1—1,2	50—400	14,0	1050
Манганин	85 % Cu, 12 % Mn, 2—4 % Ni	0,42	20—40	23,0	300
Реотан	52,3 % Ni, 16,9 % Zn, 4,5 % Fe	0,47	400	—	200
Эдвано	54 % Cu, 44 % Ni, 0,45 % Fe	0,488	10—20	—2	500

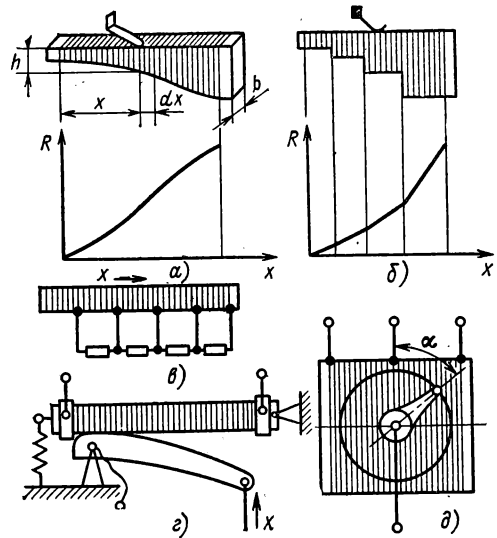


Рис. 29.51. Конструктивные исполнения реостатных датчиков с нелинейными характеристиками:

а — с фигурным каркасом; б — со ступенчатым каркасом; в — с зашунтированными секциями; г — с перекрывающимся фигурным контактом; д — синусно-косинусный

где R — выходное сопротивление датчика, Ом; q — сечение обмоточного провода, см^2 ; ρ — удельное сопротивление материала провода, Ом·см; w_0 — число витков обмотки на единицу длины каркаса, витки/см; b — толщина каркаса, см; h — переменная ширина каркаса, см.

В датчике по рис. 29.51, б обеспечивается кусочно-линейная аппроксимация требуемой зависимости. В датчике по рис. 29.51, в осуществляется шунтирование участков обмотки, расположенной на каркасе. Сопротивление шунта определяется по формуле

$$r_n = \frac{\Delta R_0 \Delta R_n}{\Delta R_0 - \Delta R_n},$$

где ΔR_0 — сопротивление секции до шунтирования, Ом; ΔR_n — требуемое сопротивление n -й секции, Ом.

В табл. 29.46 приведены технические параметры датчиков угла поворота серии ПЛ.

Распространены также: 1) датчики угла поворота типа ДУП-1 для установки на гидравлических кривошипных сервоприводах типа СПКГ; 2) датчики угла поворота типов ДК-3, ГДК-52 для измерения угла крена летательных

Таблица 29.46

Технические данные	ПЛ-1	ПЛ1-2	ПЛ2-1	ПЛ2-2
Необходимый крутящий момент, 10^{-3} Н·м	0,25	0,40	1,0	2,0
Сопротивление, Ом	500; 750; 1000; 1500; 1000; 1500; 2000; 3000; 2000; 3000; 5000; 7500; 7500; 15 000; 10 000; 10 000; 15 000; 20 000; 30 000; 20 000; 40 000			
Мощность рассеяния, Вт	2	—	5	—
Допустимая нелинейность характеристики, %	0,3	0,5	0,1	0,2
Максимальное число оборотов оси	10^5			
Срок службы, ч	300			

аппаратов; 3) датчики серии МУ для дистанционной передачи углового перемещения.

Емкостные датчики

Принцип действия основан на преобразовании входной величины и изменении емкости конденсатора. Емкость конденсатора при механическом внешнем воздействии изменяется в зависимости от типа датчика путем изменения зазора δ между электродами, площади S электродов, материала диэлектрика ϵ_a , механических деформаций диэлектрика. Чувствительность датчика

$$\frac{\partial C}{\partial \delta} = - \frac{\epsilon_a C}{\delta^2}.$$

При расчете емкостных датчиков учитываются усилие притяжения между пластинами, H ,

$$P_x = U^2 \frac{dC}{dx},$$

где x — перемещение пластины, м; C — емкость, Ф; U — напряжение питания, В.

Приводим некоторые разновидности емкостных датчиков.

1. *Серия ДЕ.* Применяются для измерения линейных размеров деталей и для контроля движущихся тел с диэлектрической проницаемостью, отличной от проницаемости воздуха. Напряжение питания 220 В (50—500 Гц); потребляемая мощность не более 14 Вт; постоянное напряжение выходного сигнала 12 В; изменение емкости входной цепи датчика, необходимое для его срабатывания, не менее 7 пФ, масса датчика 4 кг.

2. *ЭИУ-1В.* Предназначен для непрерывного измерения уровня жидких легковоспламеняющихся, горючих, взрывоопасных и агрессивных сред. Принцип действия основан на из-

менении емкости системы земля — изолированный электрод при погружении последнего в жидкость. Диапазон изменения уровня от 0 до 5 м; напряжение питания 220 В; 50 Гц; допустимая температура окружающей среды от —100 до +105 °С.

3. *ЕДО.* Предназначены для измерения пульсирующих и импульсных давлений воздуха и газов (на принципе преобразования давления, приложенного к мембране, в изменение емкости). Верхний предел изменения давления от 0,08 до 0,1 МПа при частотном диапазоне работы от 0 до 1840 Гц (в зависимости от типа датчика и погрешности).

4. *ДК-М1, ДК-М2.* Малогабаритные датчики для измерения частоты и амплитуды пульсаций давления на лопатках турбин. Диапазон изменения давления 0,05—0,065 МПа; используются в комплекте с измерительным устройством типа ЕИ-5М.

Список литературы

29.1. Буйлов А. Я. Основы электроаппаростроения. М.: Госэнергоиздат, 1946. 371 с.
29.2. Основы теории электрических аппаратов / Б. К. Буль, Г. В. Буткевич и др. М.: Высшая школа, 1970. 600 с.
29.3. Таев И. С. Электрические аппараты. Общая теория. М.: Энергия, 1977. 269 с.
29.4. Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты. М.: Энергия, 1970. 248 с.
29.5. Кузнецов Р. С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В. М.: Энергия, 1970. 543 с.
29.6. Никитенко А. Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов. М.: Высшая школа, 1983. 191 с.
29.7. Шихин А. Я. Автоматизированные системы измерительных устройств. М.: Энергия, 1977. 140 с.
29.8. Таев И. С. Электрические аппараты управления. М.: Высшая школа, 1984. 246 с.
29.9. Шопен Л. В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики. М.: Энергия, 1976. 567 с.
29.10. Агейкин Д. И., Костина Е. И., Кузнецова Н. Н. Датчики контроля и регулирования. — М.: Машиностроение, 1965. 928 с.
29.11. Реле защиты / В. С. Алексеев, Г. П. Варганов, В. И. Панфилов, Р. Э. Розенблюм. М.: Энергия, 1976. 464 с.

Раздел 30

РЕЛЕ ЗАЩИТЫ, АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

30.1. Реле тока и напряжения	586	30.4. Магнитоуправляемые контакты и устройств на их основе	591
30.2. Коммутационные и сигнальные реле. Реле времени	587	30.5. Полупроводниковые элементы релейной защиты	597
30.3. Реле сопротивления и реле частоты	589	Список литературы	600

30.1. РЕЛЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

К основным разновидностям реле тока и напряжения, применяемых в устройствах релейной защиты электрических станций, подстанций, сетей и различного электрооборудования, относятся следующие исполнения.

1. Реле тока максимальное типа РТ-40. Основано на электромагнитном принципе действия (П-образный шихтованный сердечник и Г-образный якорь) и имеет две обмотки возбуждения, которые могут соединяться последовательно или параллельно в зависимости от требуемого тока срабатывания. Диапазон уставок тока срабатывания от 0,05 до 200 А. Коэффициент возврата от 0,7 до 0,85. Время срабатывания не более 0,1 с при токе, равном 1,2 тока срабатывания, и не более 0,03 с при токе, равном 3-кратному току срабатывания.

2. Реле тока максимальное типа РТ-80. Применяется для защиты от токов перегрузки и короткого замыкания. Состоит из трех элементов: индукционного элемента, срабатывающего с выдержкой времени, зависимой от тока уставки, электромагнитного расцепителя мгновенного действия, срабатывающего при токах короткого замыкания, и индикаторного элемента, сигнализирующего о срабатывании отсечки. Уставки времени срабатывания от 0,5 до 16 с. Коэффициент возврата реле не менее 0,8. Ток срабатывания индукционного элемента от 2 до 10 А. Кратность тока при срабатывании отсечки (по отношению к току срабатывания индукционного элемента) от 2 до 8.

3. Реле напряжения РН-50. Реле максимального и минимального напряжения основано на электромагнитном принципе (П-образный шихтованный сердечник с поворотным якорем). Обмотки реле через выпрямительный мост подсоединяются к сети переменного тока. Изменение уставки осуществляется поворотом рычага и закручиванием спиральной пружины. Номинальное напряжение реле от 30 до 400 В. Пределы изменения уставки на срабатывание: 15—60 В при номинальных напряжениях реле 30 и 60 В; 50—200 В при 100 и 200 В; 100—400 В при 200 и 400 В. Коэффициент возврата 0,8. Собственное время срабатывания реле не более 0,15 с при снижении напряжения до 0,8 номинального.

4. Реле контроля синхронизма РН-55. Применяются в схемах автоматического повторного включения линий электропередачи с двусторонним питанием для контроля наличия напряжения на линии и угла сдвига фаз между векторами напряжения на линии и шинах подстанции. Исполняются на напряжениях от 30 до 100 В. Пределы изменения уставок на угол сдвига фаз от 20 до 40°. Коэффициент возврата по углу до 0,8 при номинальном напряжении. Время срабатывания 0,15 с при угле сдвига фаз, равном полуторакратному значению уставки. Потребляемая мощность каждой обмотки при номинальном режиме (номинальное напряжение и нулевой сдвиг фаз) 6,5 В·А. Коммутируемые мощности: постоянный ток 60 Вт при напряжении до 220 В и токе до 2 А (постоянная времени до 0,05 с); переменный ток 300 В·А при напряжении до 220 В и токе до 3 А. Реле основано на электромагнитном принципе. Магнитная система состоит из П-образного магнитопровода и поворотного якоря.

Реле реагирует на геометрическую разность векторов напряжения, подводимых к выводам.

5. Фильтр-реле тока обратной последовательности типа РТФ-7. Предназначено для защиты генераторов и трансформаторов при несимметричных коротких замыканиях и перегрузках токами обратной последовательности; уставки на срабатывание 0,4—0,2 номинального тока.

6. Реле тока нулевой последовательности РТЗ-50. Предназначено для использования совместно с трансформаторами тока нулевой последовательности в качестве органа, реагирующего на ток нулевой последовательности в схемах защит от замыканий на землю генераторов, двигателей и линий с малыми токами замыканий на землю. Имеются три диапазона плавно регулируемых уставок тока срабатывания: 0,01—0,02 А; 0,015—0,03 А; 0,03—0,06 А. Коэффициент возврата 0,9.

7. Реле тока обратной последовательности РТФ-6М. Предназначено для защиты мощных синхронных генераторов с форсированным охлаждением обмоток от повреждений при перегрузках токами обратной последовательности, вызванными несимметричной нагрузкой, несимметричными короткими замыканиями или ненормальными режимами работы системы. Реле образует четырехступенчатую максимальную токовую защиту обратной последовательности с действием первых двух ступеней на сигнал, а последующих двух — на отключение. Номинальный вторичный ток генератора может быть в пределах 0,7—1,0 номинального тока реле.

8. Реле напряжения нулевой последовательности РНН-57. Используется в схемах поперечных дифференциальных защит, дистанционных защит с высокочастотной блокировкой в качестве реле максимального напряжения; уставки реле 4, 5, 6, 7 и 8 В, время срабатывания 0,04 с при двукратном токе уставки.

9. Реле напряжения обратной последовательности РНФ-3. Предназначено для использования в схемах защиты в качестве органа, реагирующего на напряжение обратной последовательности при возникновении несимметричных коротких замыканий. Уставки срабатывания (линейное напряжение обратной последовательности) 13,6—24. Коэффициент возврата 0,95.

10. Реле напряжения прямой последовательности РНФ-2. Предназначено для применения в схемах форсировки возбуждения синхронных генераторов. Реле реагирует на уменьшение напряжения прямой последовательности ниже допустимого значения; не реагирует на составляющие обратной и нулевой последовательности. Уставки срабатывания 40—80 и 80—160 В линейного напряжения прямой последовательности.

11. Дифференциальные реле ДЗТ-11 с магнитным торможением. Предназначены для дифференциальной защиты одной фазы силовых трансформаторов; МДС срабатывания 100 А; мощность отключения контактов 60 Вт.

12. Реле направления мощности РМБ-170/270. Основано на индукционном принципе (система с дисковым ротором). Номинальное переменное напряжение 100 В (50 Гц). Мощность срабатывания 0,2—4 В·А. Номинальный ток 1 или 5 А. Коэффициент возврата 0,6. Время действия реле при трехкратной мощ-

ности срабатывания 0,04 с. Угол максимальной чувствительности около -35 или $+70^\circ$ для разных типов реле. Обеспечивает правильный выбор направления мощности при токе, 20-кратном номинального, и напряжении 15 В, при токе 0,2 номинального и напряжении 100 В.

13. Реле активной мощности РБМ-275. Предназначено для контроля активной мощности одной фазы сети переменного тока. Реле имеет два диапазона регулируемых уставок мощности срабатывания: 10 — 500 и 2 — 100 Вт. Коэффициент возврата 0,85. Время срабатывания 0,12 с.

14. Реле реактивной мощности РБМ-276. Предназначено для контроля реактивной мощности одной фазы сети переменного тока. Диапазон регулирования мощности срабатывания у реле с номинальным током 1 А — от 1,2 до 100 В·А, у реле с номинальным током 5 А — от 6 до 500 В·А.

15. Реле мощности обратной последовательности РМОП-2. Предназначено для защиты многообмоточных трансформаторов, автотрансформаторов и линий электропередачи при несимметричных коротких замыканиях. В состав реле входят: два промежуточных трансформатора тока, активно-емкостные фильтры тока и напряжения обратной последовательности, индукционный элемент направления мощности и пусковые реле тока обратной последовательности. Ток небаланса при симметричном токе прямой последовательности, равном трехкратному номинальному, не превышает 1,7 мА. Напряжение небаланса при симметричном напряжении прямой последовательности 100 В не превышает 2,6 В. Уставки срабатывания пускового реле тока 0,2—0,8 номинального тока. Коэффициент возврата пускового реле 0,8, реле направления мощности — 0,5.

16. Реле отстройки от апериодической составляющей РНТ-560. Основано на применении насыщающихся трансформаторов и предназначено для дифференциальной защиты силовых трансформаторов, генераторов и шин. Магнитодвижущая сила срабатывания 100 А. Время срабатывания при трехкратном токе срабатывания 40 мс. Реле выдерживает 5000 срабатываний, из них 500 срабатываний с нагруженными контактами.

17. Реле перегрузки ИМ-145. Предназначено для защиты генераторов переменного тока от перегрузки при отключении параллельно

работающего генератора. Построено на индукционном принципе (с бегущим магнитным полем). Имеет зависимость от мощности выдержку времени. Предусмотрена возможность изменения уставки на мощность срабатывания и на выдержку времени срабатывания.

30.2. КОММУТАЦИОННЫЕ И СИГНАЛЬНЫЕ РЕЛЕ. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

Основной класс коммутационных реле образуют электромагнитные промежуточные реле, отдельные разновидности и характеристики которых приводятся ниже (характеристики некоторых реле даны в табл. 30.1).

1. Реле промежуточные серии РП-220. Реле быстродействующие. Предназначены для использования в цепях постоянного тока в тех случаях, когда требуется усилить или размножить действие контактов основных реле защиты. Для увеличения быстродействия сердечник реле выполнен шихтованным. У некоторых исполнений реле (РП-223, РП-224), помимо основной обмотки, имеются две или три удерживающие токовые обмотки, включенные последовательно с замыкающими контактами. При отсутствии напряжения якорь реле может удерживаться в притяннутом положении при прохождении тока по любой из удерживающих обмоток.

2. Реле промежуточные серии РП-230. Предназначены для применения в цепях постоянного тока в тех случаях, когда требуется срабатывание реле от токовой обмотки и удержание якоря в притяннутом положении обмоткой напряжения (РП-232) или срабатывание реле от обмотки напряжения и удержание обмоткой тока (РП-233).

3. Реле промежуточные серии РП-251. Предназначены для применения в цепях постоянного тока с замедлением при срабатывании. Замедление достигается с помощью медных демпфирующих шайб, расположенных на сердечнике.

4. Реле промежуточное РП-252. Предназначено для применения в цепях постоянного тока с замедлением при возврате. Замедление обеспечивается медными демпфирующими шайбами и медным каркасом катушки электромагнита. Для уменьшения зависимости времени

Т а б л и ц а 30.1. Параметры некоторых промежуточных реле

Тип	Число контактов	Номинальное напряжение, В		Длительный ток контактов, А	Допустимая частота срабатываний, ч ⁻¹	Износостойкость, число срабатываний		Цена, руб.
		постоянное	переменное			коммутационная	механическая	
ПЭ-20	4р+4з	—	12—240	5	—	$(1-2) \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^6$	3,6
ПЭ-21	4—8	12—220	12—380	5	3000	до $3 \cdot 10^3$	$(3-5) \cdot 10^6$	—
ПЭ-23	3з+3р	12—110	12—240	4	3000	$(1-3) \cdot 10^3$	$(5-10) \cdot 10^6$	—
РП-23	5	12—220	—	—	—	—	—	—
РП-41, РП-42	8, 4	12—220	—	10	—	10^3	10^7	—
ЭП-41В	3—6	—	36—500	16	1200	10^6	—	—
РП-8, РП-9	1—7	24—220	24—220	24—220	—	—	—	—
РП-11, РП-12	—	—	—	—	—	—	—	—
РПШ-0	4—12	—	12—50	12	2000	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	4,8
МКУ-48с	2—6	12—220	24—380	5	3600	$25 \cdot 10^6$	—	—
МКУ-48г	2—8	12—220	24—380	5	3600	10^6	—	—

Примечание: з — замыкающие контакты; р — размыкающие контакты.

возврата от напряжения сердечник электромагнита при притянута якоря сильно насыщен (индукция у зазора 1,6 Тл).

5. Реле промежуточное РП-253. Предназначено для применения в цепях постоянного тока в тех случаях, когда требуется удержание якоря в притянутаом положении при прохождении тока в контролируемой цепи, замедленное срабатывание и быстрый возврат. Для замедления срабатывания применена демпферная обмотка, расположенная на одном каркасе с рабочей обмоткой.

6. Реле промежуточные РП-321. Применяются в схемах защиты на переменном токе. Предназначены для непосредственного включения в цепи вторичных обмоток трансформаторов тока. Термическая стойкость реле при токах короткого замыкания обеспечивается при-

менением промежуточного насыщающегося трансформатора.

7. Реле промежуточное РП-341. Предназначено для шунтирования и дешунтирования отключающей обмотки выключателя, включенной вместе с реле непосредственно в цепь вторичной обмотки трансформатора.

Разновидности контрольно-сигнальных реле представлены в табл. 30.2, реле времени — в табл. 30.3.

Другие разновидности реле.

Блок указательных реле БРУ-4. Состоит из четырех указательных реле РУ-21, действующих независимо друг от друга. Контакты реле допускают 250 срабатываний при полной электрической нагрузке. Время срабатывания реле 0,05 с. Вес блока 1,6 кг.

Комплект реле времени ЭВ-215К—ЭВ-245К.

Т а б л и ц а 30.2. Различные реле автоматики

Наименование	Тип реле	Номинальное напряжение или ток срабатывания	Число вспомогательных контактов	Оптовая цена за штуку, руб
Реле импульсной сигнализации	РИС-ЭЗМ	~220 В	1з+1р	21,0
Реле сигнальные	РИС-ЭЗМ-02	=18; 60; 220 В	1з+1р	29,0
	РУ-21	=0,01—4 А (токовые) =12; 48; 220 В (напряжения)	2з	3,3
Сигнальные устройства	ЭС-41	От=0,01 до 0,5 В	4	—
Блоки сигнальных реле	СЭ-2	От=0,01 до 1,0 А	2з	—
Реле счетно-импульсное	Е-531	~220 и 380 В	1з+1р	27,0
Реле счетно-шаговое	Е-526	~127; 220 и 380 В	29 положений	114,0
Реле обрыва фаз	Е-511	~380 В	1з+1р	10,9
Реле счета импульсов	РСИ-1	~320 В	1з+1р	—
	РСИ-2	=220 В	—	—
Шаговые искатели	ШИ-25	=24; 48; 60 В	—	—
	ШИ-50	—	—	—
Реверсивные шаговые искатели	РШИ-25	=90 В; ~127; 220 и 380 В	—	—
Реле угловой скорости	РС-2М	~220 В	1з+1р	—

Примечание: з — замыкающие контакты; р — размыкающие контакты.

Т а б л и ц а 30.3. Реле времени

Реле	Особенности конструкции	Напряжение, В	Диапазон выдержки времени, с	Число контактов		Ток через контакты, А				Примечание
				з	р	для длительной работы	отключаемый	включаемый	включаемый	
РЭВ-810	Постоянного тока. Замедление с помощью магнитного демпфирования (медная гильза, залитое алюминием основание)	12, 24, 48, 110 и 220	0,25—3,8	1,2	1,2	10	1—40	20—10	—	Могут применяться также в качестве реле тока и напряжения; контакторы: раствор 3,5 мм, провал 1,5 мм, нажатие 1 Н
Е-510	Моторные постоянного тока (программные)	110 и 20	1—360	—	4	5	2	—	—	—
ЭВ-100	Постоянного тока с анкерным механизмом	24, 48, 110 и 220	0,1—20	1	—	3—5	1—5	—	—	—
ЭВ-200	Переменного тока с анкерным механизмом	127, 220	0,1—20	1	1	3—5	2,5	—	—	Используется в схемах релейной защиты и автоматики
РВ-4	Моторные переменного тока	127, 220, 380	—	1	1	—	—	—	—	—
РЭВ-800	Постоянного тока с магнитным демпфированием	12, 24, 48, 110, 220	0,25—5,5	1,2	1,2	10	1—15	10—80	—	—
РЭВ-80	То же	22, 24, 48	0,25—1,3	1,2	1,2	10	2—15	10—80	—	Могут применяться также в качестве реле напряжения
РС-30	На герконах	24—240	1—90	—	—	2,5	—	—	—	—
РВГ-20111	То же	12 и 24	0,2—0,7	—	—	0,1	—	—	—	—
ВЛ-23	Полупроводниковые	110, 220	1—100; 0,1—10 мин	—	—	—	—	—	—	Используются в схемах управления и автоматики
ВЛ-37	То же	24	0,1—10; 0,2—200	—	—	4	—	—	—	—

Применяется в схемах релейной защиты на переменном токе для создания выдержки времени при возврате реле из-за исчезновения или резкого снижения напряжения в контролируемой цепи. Обмотки реле питаются выпрямленным напряжением от трехфазного двухполупериодного выпрямителя.

30.3. РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И РЕЛЕ ЧАСТОТЫ

Реле сопротивления действует при определенном полном или реактивном сопротивлении, равном сопротивлению уставки в контролируемой им зоне. Оно срабатывает при коротких замыканиях в контролируемой им зоне и не действует при повреждениях вне этой зоны. Реле срабатывает при изменении сопротивления независимо от абсолютных значений токов и напряжений.

Сопротивление уставки реле сопротивления может меняться изменением числа витков токовой обмотки реле; изменением числа витков обмотки напряжения или путем изменения напряжения на обмотке напряжения при помощи вспомогательного автотрансформатора.

Реле сопротивления могут выступать в роли измерительного органа (например, реле типа КРС-111) или в качестве пускового органа в схемах дистанционных защит (например, реле типа КРС-112).

Назначением пусковых органов дистанционных защит является пуск в действие защиты только при возникновении аномальных условий; они не срабатывают при эксплуатационных перегрузках и изменениях сопротивления, но непременно срабатывают при аварийных ситуациях, например, при коротких замыканиях как металлических, так и через переходные сопротивления.

Реле сопротивления типов КРС-111 и КРС-112 основаны на индукционном принципе и выполнены на четырехполюсной магнитной системе с зазором 2 мм.

Реле сопротивления КРС-111 предназначено для включения на разность токов двух фаз и линейное напряжение между ними и может работать в длительном и кратковременном режимах. Изменение режима работы производится изменением числа первичных витков автотрансформатора напряжения. Изменение уставки осуществляется путем соответствующего выбора числа первичных витков трансформатора (трансформатора тока с воздушным зазором, включаемого на вход токовой обмотки и предназначенного для получения напряжения, пропорционального току и сдвинутого относительно него на некоторый угол) и автотрансформатора напряжения. Реле имеет один замыкающий контакт.

Минимальные значения сопротивления срабатывания по оси реактивных сопротивлений (обеспечиваемые регулировкой в цепях тока) для реле КРС-111 приведены в табл. 30.4.

Реле сопротивления КРС-112 включается на фазный ток и линейное напряжение; предусмотрена возможность переключения при замыкании на землю на фазное напряжение. Реле имеет замыкающий и размыкающий контакты. Номинальный ток 1 или 5 А; номинальное на-

Таблица 30.4. Минимальные значения сопротивления срабатывания реле КРС-111 (в числителе приведены значения для кратковременного режима работы, а в знаменателе — для длительного)

Номинальный ток, А	Сопротивления срабатывания, Ом/фазу, при установке трансформаторов, Ом/фазу			
	0,12	0,25	0,5	0,75
1	$\frac{0,625 \pm 0,075}{1,25 \pm 0,15}$	$\frac{1,25 \pm 0,15}{2,5 \pm 0,3}$	$\frac{2,5 \pm 0,3}{5 \pm 0,6}$	$\frac{3,75 \pm 0,45}{7,5 \pm 0,9}$
5	$\frac{0,125 \pm 0,015}{0,25 \pm 0,03}$	$\frac{0,25 \pm 0,03}{0,5 \pm 0,05}$	$\frac{0,5 \pm 0,05}{1,0 \pm 0,12}$	$\frac{0,75 \pm 0,09}{1,5 \pm 0,18}$

пряжение 100 В, частота 50 Гц. Диапазон рабочих температур от -20 до $+40^\circ\text{C}$.

Реле КРС-112 имеет минимальное значение сопротивления срабатывания 10 ± 1 Ом/фазу (при $I_{\text{ном}}=1$ А) и $2 \pm 0,2$ Ом/фазу (при $I_{\text{ном}}=5$ А). Регулировка в цепь напряжения обеспечивает 10-кратное увеличение сопротивления срабатывания (табл. 30.4) со ступенями, не превышающими 5 % наибольшего значения уставки.

Диапазон изменения фазных токов короткого замыкания, в которых обеспечивается 10 %-ная точность, находится в пределах (для КРС-111): $0,27-40$ А (при $I_{\text{ном}}=1$ А) и $1,35-200$ А (при $I_{\text{ном}}=5$ А); для реле КРС-112: $0,4-10$ А (при $I_{\text{ном}}=1$ А) и $2-50$ А (при $I_{\text{ном}}=5$ А). Уставка автотрансформатора напряжения практически не влияет на ток точной работы реле. Реле не замыкают своих замыкающих контактов при сбросе напряжения со 100 В до нуля и обесточенных токовых цепях.

Время срабатывания реле КРС-111 и КРС-112 не превышает 0,08 с при коротком замыкании в пределах 0,7 длины зоны и токах, в 2 раза больших тока начала точной работы. Время размыкания размыкающего контакта реле КРС-112 при тех же условиях не более 0,04 с. Мощность, потребляемая цепями переменного тока при номинальном токе, не превышает 4,5 В·А на фазу у реле КРС-111 и 4 В·А на фазу у КРС-112. Мощность, потребляемая цепями напряжения при номинальном напряжении в длительном режиме, не превышает 20 В·А у КРС-111 и 35 В·А у КРС-112. Реле в длительном режиме могут выдерживать 110 % номинальных значений тока и напряжения. Разрывная мощность контактов реле в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой (постоянная времени не более 0,005 с) не менее 30 Вт при напряжении до 250 В и токе до 1,5 А.

Масса реле около 11 кг.

Трехфазное реле сопротивления КРС-121 на четырехполюсной системе с зазором 2 мм применяется в схемах дистанционных защит в качестве измерительного органа, реагирующего на двухфазные короткие замыкания между любыми фазами (с землей и без земли) без

Таблица 30.5. Минимальные значения сопротивления срабатывания, обеспечиваемые регулировкой в цепях тока

Номинальный ток, А	Сопротивление срабатывания, Ом/фазу, при уставке трансреактора, Ом/фазу			
	0,25	0,5	1	2
1	1,25±0,15	2,5±0,3	5,5±0,6	11±1
5	0,25±0,03	0,5±0,06	1,1±0,1	2,2±0,2

переключений в цепях измерительных трансформаторов тока и напряжения и позволяющего осуществлять двухступенчатую дистанционную защиту. Реле имеет один замыкающий контакт. Регулировка в цепи напряжения обеспечивает 10-кратное увеличение сопротивлений срабатывания, приведенных в табл. 30.5, со ступенями, не превышающими 5 % наибольшего значения уставки.

При двухфазных коротких замыканиях различных фаз разность между наибольшим и наименьшим значениями сопротивления срабатывания не превышает 6 % их среднеарифметического значения. Мощность, потребляемая цепями реле при номинальных токе и напряжении, не превышает 10 В·А/фазу у цепей тока и 35 В·А/фазу у цепей напряжения. Остальные данные реле КРС-121 как у КРС-111 и КРС-112.

Масса реле не более 18 кг. Цена от 7 до 8,2 руб.

Направленные реле сопротивления КРС-131 и КРС-132. Реле КРС-131 предназначено для применения в качестве измерительного органа, а реле КРС-132 — в качестве направленного пускового органа различных схем релейных защит. Реле включаются на разность токов двух фаз и линейное напряжение между ними и реагируют на уменьшение ниже установленного уровня полного сопротивления на зажимах реле при двух- и трехфазных коротких замыканиях.

У реле КРС-132 уставка меняется только путем изменения коэффициента трансформации автотрансформатора напряжения. Минимальная уставка сопротивления срабатывания КРС-132 равная 10 Ом/фазу при $I_{ном}=1$ А и 2 Ом/фазу при $I_{ном}=5$ А. Минимальные уставки сопротивления срабатывания КРС-131 даны в табл. 30.6. Мощность, потребляемая токовыми цепями при номинальном токе, не превышает 7 В·А/фазу у реле КРС-131 и 5 В·А/фазу у КРС-132. Цепи напряжения обоих реле при номинальном напряжении потребляют не более 40 В·А/фазу.

Остальные технические данные соответствуют подобным же для реле КРС-111.

Масса реле около 12,5 кг.

Реле сопротивления КРС-142 и КРС-143 предназначены для использования в качестве избирателя поврежденной фазы на линиях электропередачи 110—500 кВ в схемах однофазного автоматического повторного включения. Реле КРС-142 используется совместно с

Таблица 30.6. Минимальные уставки сопротивления реле КРС-131, обеспечиваемые регулировкой в цепях тока

Номинальный ток, А	Сопротивление срабатывания, в Ом/фазу, при уставке трансреакторов, Ом/фазу			
	0,25	0,5	1	2
1	1,25±0,15	2,5±0,3	5±0,5	10±1
5	0,25±0,03	0,5±0,06	1±0,1	2±0,2

устройством ОАПВ-3, а КРС-143 — с ОАПВ-502. Реле включается на фазное напряжение, соответствующий фазный ток и утроенный ток нулевой последовательности. Схема включения первичных обмоток трансреакторов обеспечивает токовую компенсацию. Реле имеет один замыкающий контакт. В отличие от ранее распространенных реле имеет три уставки $\varphi_{м.ч}$ (65, 75 и 85°). Реле обладает направленностью действия. Между собой различается лишь значением коэффициента компенсации. Номинальный ток реле 1 или 5 А, напряжение $100\sqrt{3}$ В, частота 50 Гц. Минимальные уставки сопротивления, Ом/фазу, при $\varphi_{м.ч}=75^\circ$ и токи начала точной работы при различных уставках сопротивления срабатывания (на трансреакторах) приведены в табл. 30.7.

При номинальных токе и напряжении мощность, потребляемая цепями тока, не более 17 В·А, а цепями напряжения — 45 В·А. Реле кратковременно замыкает свои контакты при коротком замыкании в мертвой зоне, если ток короткого замыкания в 2 раза и более превышает ток начала точной работы.

Масса реле около 14 кг.

Реле частоты — основные элементы устройств противоаварийной автоматики энергосистем: автоматической частотной разгрузки

Таблица 30.7. Параметры реле КРС-142 и КРС-143

Реле	Номинальный ток, А	Сопротивление срабатывания, Ом/фазу, при уставке трансреактора, соответствующей присоединению к выводам		Ток начала точной работы, А, при уставке трансреактора, соответствующей присоединению к выводам	
		1—1	2—2	1—1	2—2
КРС-142	1	5±0,5	10±1	0,8	0,4
	5	1±0,1	2±0,2	4	2
КРС-143	1	4,5±0,5	9±0,9	0,88	0,44
	5	6,9±0,1	1,8±0,18	4,4	2,2

(АЧР), частотного автоматического повторного включения (ЧАПВ), аварийной автоматики форсировки возбуждения генераторов электростанций при снижении частоты, длительных защит по частоте и других устройств.

Реле разности частот ИРЧ-01А предназначено для схем автоматической, полуавтоматической и ручной синхронизации синхронных генераторов и компенсаторов. Реле основано на индукционном принципе и выполнено на четырехполюсной магнитной системе. Реле имеет два параллельно соединенных неподвижных контакта, установленных симметрично относительно среднего положения подвижного контакта.

При разности частот сети и синхронизируемого генератора около 1 Гц происходят кратковременные замыкания контактов, подхватываемые промежуточным реле РП-23 с самодержанием. Шкалы уставок реле не имеет. Номинальное напряжение 100 В с частотой 50 Гц. Номинальный ток обмотки полюсов 55 ± 15 мА. Длительность включения обмотки ярма при напряжении $1,1U_{ном}$ не более 15 мин. Диапазон частот надежной работы 40—60 Гц. Разность частот срабатывания реле 1 Гц при номинальных токе и напряжении и может находиться в пределах 0,35—2 Гц при изменении напряжения сети от 50 до 120 В и токе в обмотке полюсов от 45 до 100 мА. Мощность, потребляемая обмоткой ярма при номинальном напряжении, не более 35 В·А. Коммутационная способность контактов в цепи постоянного тока не менее 50 Вт при постоянной времени нагрузки не более 0,005 с, напряжении до 250 В и токе до 2 А. Диапазон рабочих температур от -20 до $+40^\circ\text{C}$.

Масса реле около 5 кг. Цена 2,5 руб.

Реле понижения частоты ИВЧ-3 предназначено для схем автоматической частотной разгрузки для контроля частоты переменного тока. Реле индукционного типа выполнено на четырехполюсной системе; имеет один замыкающий контакт мостикового типа с двумя последовательными разрывами. Реле имеет два диапазона уставок по частоте срабатывания (45—46,5 и 46,5—49 Гц); плавная регулировка частоты срабатывания может быть достигнута изменением сопротивления контура обмотки полюсов. Частоты срабатывания и отпускания уменьшаются при увеличении добавочного сопротивления в контуре обмотки полюсов. Номинальное напряжение реле 100 В, 50 Гц. Отклонение частоты срабатывания от уставки при номинальных напряжении и температуре не превышает 0,2 Гц. Минимальная разность частот срабатывания и отпускания на любой уставке не превышает 0,1 Гц; предусмотрена возможность автоматического увеличения частоты возврата до 50 Гц включительно. Разность максимальной и минимальной частот срабатывания при изменении напряжения на реле от 60 до 125 В на любой уставке не превышает 0,2 Гц. Мощность, потребляемая реле при номинальных напряжении и частоте, не превышает 10 В·А. Реле длительно выдерживает напряжение, равное $1,1U_{ном}$. Разрывная мощность контактов в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой (постоянная времени не более 0,005 с) не менее 50 Вт при напряжении до 250 В и токе до 2 А.

Масса реле не более 5,5 кг. Цена 2,6 руб.

Реле повышения частоты ИВЧ-15 предназначено для схем автоматики в качестве органа, реагирующего на повышение частоты. Реле имеет один диапазон уставок, а в основном оно аналогично реле ИВЧ-3. Частота плавно регулируется от 50,5 до 53 Гц. Разность максимальной и минимальной частот срабатывания при изменении напряжения на реле от 80 до 110 В не превышает 0,2 Гц. Мощность, потребляемая реле при номинальных напряжении и частоте, не более 16 В·А.

30.4. МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫЕ КОНТАКТЫ И УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ

Магнитоуправляемый контакт (МК) представляет собой самостоятельную контактную пару (или группу), управляемую внешним магнитным полем, созданным электрическим током, постоянным магнитом (ПМ) или же ими совместно (рис. 30.1).

МК с герметизированными контактами — герконы могут применяться в качестве контактных пар в реле напряжения и тока, кнопках, датчиках положения, круговых и шаговых переключателях, коммутаторах, распределителях, указателях, сигнализаторах и т. п.

Конструкции некоторых отечественных герконов изображены на рис. 30.2, а технические данные приведены в табл. 30.8.

На базе герконов выпускаются следующие устройства.

Реле времени серии РВГ — полупроводниковые реле времени со встроенным реле РПГ-3 с герконом КЭМ-3; имеет следующие диапазо-

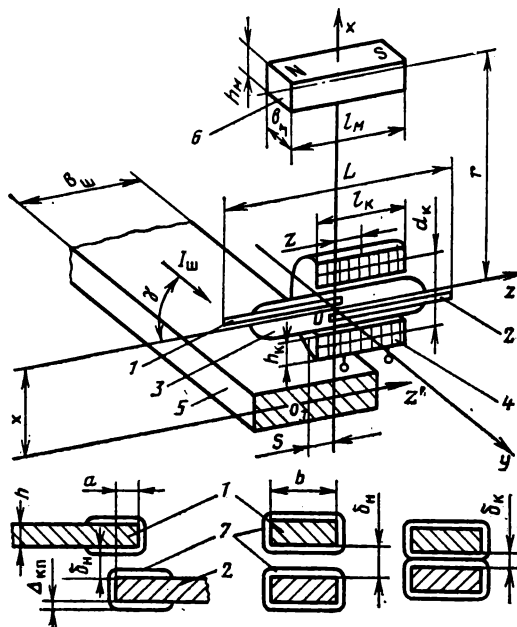


Рис. 30.1. Возможные способы управления герконом:

1 и 2 — контакт-детали; 3 — баллон геркона; 4 — обмотка управления; 5 — шина с током; 6 — постоянный магнит; 7 — контактное покрытие контакт-деталей

Т а б л и ц а 30.8. Основные показатели некоторых отечественных герконов

Параметры	МКА-52202*	КЭМ-1	КЭМ-2	КЭМ-3	КЭМ-6	МК-10	МК-17	МК-27
Общая длина, мм	80	79	41	54	64	40	45	45
Длина баллона, мм	50	50	20	18	37	10	20	28
Диаметр баллона, мм	7	5,4	3	4	4,2	2,3	3,1	3,6
Максимальная коммутируемая мощность, Вт	100	30	9	7,5	12	0,6	7,5	12
Максимальный коммутируемый ток, А	4	1	0,25	0,25	0,15	0,03	0,25	0,35
Максимальное коммутируемое напряжение, В	220	250	180	180	220	36	80	127
Максимальное время срабатывания, мс	8	3	1	1,5	2	0,8	1,5	2,3
Максимальное время отпускания, мс	7	0,8	0,3	2	0,5	0,3	0,3	0,5
Максимальная МДС срабатывания, А	300	110	65	100	50	40	80	80
Минимальная МДС отпускания, А	—	25	10	15	—	—	—	15
Максимальный коэффициент возврата	—	0,85	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,85
Минимальный коэффициент возврата	0,3	0,45	0,35	0,35	0,3	0,5	0,5	0,35
Максимальное число срабатываний	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	—	—	10 ⁶	—	10 ⁶
Цена за штуку, руб.	2,2	0,32	0,2	0,5	0,22	0,3	0,7	0,13
Тип контактов	*	Замык.	Замык.	Переключ.	Замык.	Замык.	Замык.	Замык.

* Герконы МКА-52202 выпускаются в двух исполнениях: с замыкающими и переключающими контактами.

ны выдержек, с: 0,02—0,2; 0,1—1,0; 0,5—5,0; 2,0—20; 10—100; 30—300; 60—600; 120—1200. Основная погрешность реле не превышает 3 %. Время подготовки реле к работе не более 0,2 с.

Реле с памятью серии РМГ построены на герконах МУК-1А; управление осуществляется импульсами напряжения длительностью не менее 1,0 мс. Время нераспадающейся «памяти» не менее 1250 ч. Реле содержит два независимых блока с тремя контактами каждый. Средняя стоимость реле 11 руб.

Реле тока серии РТГ применяются в схемах автоматики с постоянным или выпрямленным с частотой пульсации не менее 300 Гц напряжением до 500 В. Исполнения реле различаются по виду элемента управления (катушка или шина), номинальному току и пределу регулировки уставок (от 0,7 до $3I_{ном}$). Реле имеют исполнения по номинальному току от 1,6 до 1000 А. Разброс тока срабатывания реле не превышает $\pm 10\%$ от величины соответствующей уставки. Реле не защищены от влияния внешних магнитных полей, поэтому при установке расстояние от контура реле до посторонних ферромагнитных тел (кроме установочной плиты) должно быть не менее максимального габаритного размера реле.

На базе герконов КЭМ-1, КЭМ-2 и КЭМ-3 выпускаются реле серии РЭС: с одним замыкающим контактом (РЭС-42, РЭС-45, РЭС-64); с двумя замыкающими контактами (РЭС-43, РЭС-46); с тремя замыкающими контактами (РЭС-44) и с одним переключающим герконом КЭМ-3 (РЭС-55). Реле этой серии имеют массу менее 55 г и потребляют мощность не более 0,14 Вт при напряжении питания 27 В. Цена за 1 шт. от 2,05 до 10 руб.

Реле промежуточные серии РПГ различаются по числу и роду контактов, количеству реле в одном корпусе, количеству обмоток управления и способу крепления и присоединения

проводов (для заднего крепления и для переднего крепления). Реле РПГ-1 на герконе КЭМ-1 и РПГ-9 на герконе МКА-52202 унифицированы по габаритным и установочным размерам с логическими элементами серии «Логика-Т». Цена реле этой серии от 4,7 до 9,5 руб.

Реле РПГ-2, РПГ-3, РПГ-5, РПГ-6 и РПГ-8 предназначены для печатного монтажа и работают совместно с полупроводниковыми элементами и интегральными микросхемами.

Реле РПГ-4 на герконах КЭМ-1А и РПГ-10 на герконах МКА-52202 предназначены для переднего присоединения под винт.

Реле РПГ имеют массу менее 0,4 кг и потребляют мощность не более 6 Вт. Цена за 1 шт. от 1,45 до 3,5 руб.

Переключатели круговые серии ПКГ применяются в устройствах для выдачи информации о позиции, занимаемой вращающимися узлами. В качестве коммутирующего элемента используется геркон КЭМ-1. Переключатели имеют семь исполнений по числу контактов и два исполнения по габаритным размерам: номинальный ток до 0,5 А; напряжение контактов постоянного тока до 110 В, переменного тока частоты 50—60 Гц до 24 В; габаритные размеры переключателя с 4, 5, 6 и 8 контактами 120×100×75 мм, а переключателя с 10, 12 и 16 контактами 162×142×75 мм; масса до 1,05 кг. Цена переключателей от 21,5 до 34 руб.

Элементы расчета устройств на герконах

Расчет устройств, использующих стандартные замыкающие герконы (рис. 30.3), может вестись в следующей последовательности.

1. Определяются все размеры геркона (на основании данных рис. 30.2 или под микроскопом).

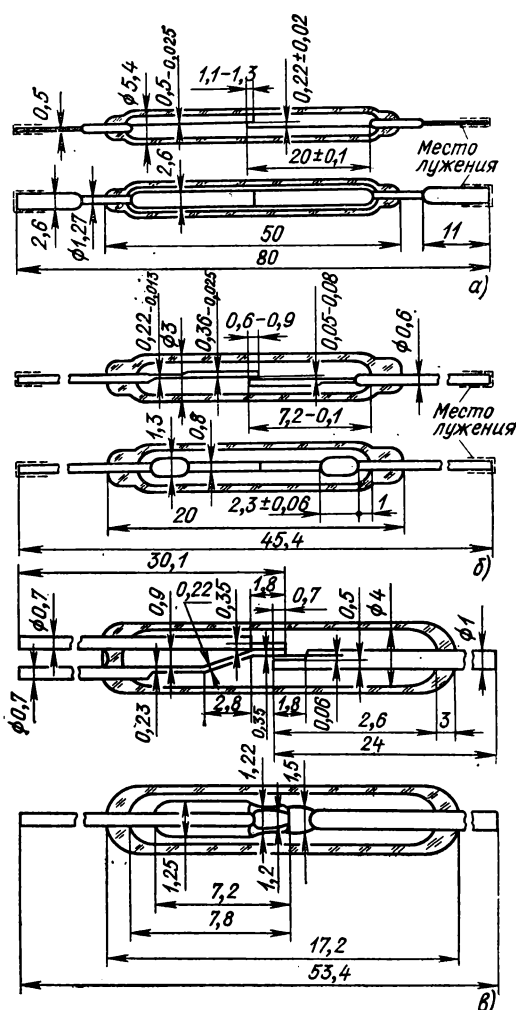


Рис. 30.2. Конструкции герконов:
а — КЭМ-1; б — КЭМ-2; в — КЭМ-3

2. Подсчитывается коэффициент неравномерности магнитного поля в рабочем зазоре геркона между перекрывающимися концами контакт-деталей (К-Д)

$$K = 6,66 + 44,4h/b.$$

Здесь и далее все обозначения соответствуют рис. 30.1, 30.3, 30.4.

3. Вычисляется значение зазора $\delta_{ср}$ срыва (срабатывания):

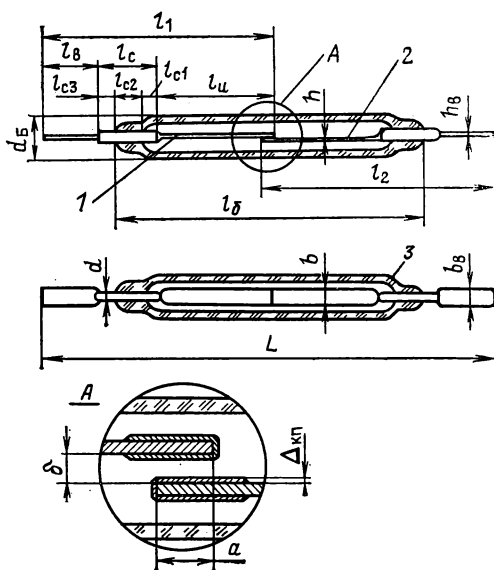
$$\delta_{ср} = \frac{K\delta_n - a}{2K},$$

где δ_n и a — начальный зазор и перекрытие К-Д 1 и 2 (см. рис. 30.3).

4. Рассчитывается внутренняя магнитная проводимость Λ_δ рабочего зазора:

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \frac{b}{\delta} \sqrt{a(a + K\delta)},$$

где μ_0 — магнитная постоянная, равная $0,4\pi \times 10^{-6}$ Гн/м.



6. Определяются длина l_k и толщина h_k окна обмотки управления. Для снижения МДС срабатывания желательнее

$$l_k = \frac{Q[3d(L + \pi d) - 2Q]}{2d_B Q + \sqrt{d_B Q d[3(L + \pi d)(2d_B - d) + 2Q]}} \approx \approx \frac{3}{8} \frac{d(L + \pi d)}{d_B} \text{ и } h_k = Q/l_k \approx d_B.$$

7. Подсчитывается внешняя магнитная проводимость $\Lambda_{вш}$. Она в сильной степени зависит от способа управления герконом: полем катушки с током или полем шины с током (см. рис. 30.1).

Если геркон управляется катушкой, то

$$\Lambda_{вш}^k = \frac{2 - (z/L)(1 + z/L)}{3\pi} \mu_0 \frac{3(L + \pi d) - l_k}{2 - d/d_k};$$

$$d_k = d_B + h_k,$$

где z — смещение центра обмотки относительно середины перекрытия К-Д (см. рис. 30.1).

Если геркон управляется полем шины с током, то

$$\Lambda_{вш}^{ш} = \frac{2 - (s/L)(1 + s/L)}{12\pi} \mu_0 [3(R_B + \pi d) - - b_{ш}](1 - x/R_B) \sin \gamma;$$

$$R_B = 0,25(2x + \sqrt{4x^2 + L^2}),$$

где s — смещение середины шины относительно центра перекрытия К-Д (см. рис. 30.1).

8. Определяются индукция $B_{ср}$ срабатывания при зазоре $\delta_{ср}$ и индукция B_k отпуска при зазоре δ_k

$$B = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{2\mu_0 C (\delta_k - \delta)(a + K\delta)}{b}},$$

где δ — текущее значение рабочего зазора; C — приведенная жесткость К-Д. Обычно жесткость C составляет 500–1000 Н/м.

Полная (приведенная) жесткость C зависит от жесткостей C_1 и C_2 обеих К-Д:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Для любой К-Д, состоящей из трех участков (рис. 30.4),

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{3E} \left(\frac{l_{III}^3 - l_{II}^3}{J_3} + \frac{l_{II}^3 - l_I^3}{J_2} + \frac{l_I^3}{J_1} \right).$$

Здесь E — модуль упругости материала К-Д (для большинства материалов, из которых изготавливают К-Д, можно принять $E = 1,36 \times 10^{11}$ Па); J — моменты инерции поперечных сечений рассматриваемых участков.

Моменты инерции наиболее распространенных форм поперечного сечения следующие: для прямоугольной формы

$$J = bh^3/12;$$

для кольца

$$J = \pi (D^4 - d^4)/64,$$

где b и h — ширина и высота фигуры (изгиб происходит в направлении h и поперек b); D и d — внешний и внутренний диаметры кольца.

9. Если в системе имеется постоянный магнит, то по известным размерам стержневого постоянного магнита, который может создавать поляризующее поле устройства (см. рис. 30.1), рассчитывается его внешняя магнитная проводимость Λ_M :

$$\Lambda_M = \frac{4}{3\pi} \mu_0 \sqrt{S_M} \left(\kappa + 1,5 \sqrt{K_\Phi} \right);$$

$$\kappa = l_M / \sqrt{S_M};$$

$$K_\Phi = \rho_M^2 / S_M;$$

где S_M и ρ_M — площадь поперечного сечения и внешний периметр поперечного сечения постоянного магнита.

10. Находится индукция B_M в нейтральном сечении магнита и его напряженность H_M :

$$B_M = \frac{2B_r \Lambda_M}{\Lambda_M + \frac{B_r S_M}{H_c l_M} + \rightarrow \frac{B_r S_M}{H_c l_M} + \sqrt{\left(\Lambda_M + \frac{B_r S_M}{H_c l_M} \right)^2 - 4\alpha \Lambda_M \frac{B_r S_M}{H_c l_M}}};$$

$$H_M = H_c \frac{B_r - B_M}{B_r - \alpha B_M},$$

где B_r , H_c и α — остаточная индукция, коэрцитивная сила и коэффициент прямоугольности материала выбранного постоянного магнита.

11. Определяется напряженность H_r в рабочем зазоре геркона, созданная постоянным магнитом (см. рис. 30.1):

$$H_r = \frac{V_M}{4\pi} \left(\frac{B_M}{\mu_0 H_M} + 1 \right) \times \times \frac{H_M}{\sqrt{\left[r^2 + \sqrt{\left(\frac{V_M}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{B_M}{\mu_0 H_c} + 1 \right)^2} \right]^3}},$$

где V_M — объем стержневого постоянного магнита, продольная ось которого параллельна предельной оси геркона, а поперечная ось лежит в одной плоскости с поперечной осью геркона.

12. Вычисляются МДС $F_{ср}^k$ срабатывания при $\Lambda_\delta = \Lambda_{ср}$ и МДС $F_{отп}^k$ при $\Lambda_\delta = \Lambda_{отп}$ геркона, управляемого обмоткой с током, при наличии поляризующего действия шины с током $I_{ш}$ и постоянного магнита (см. рис. 30.1)

$$F^k = \left(Bbh \mp \frac{I_{ш}}{1/\Lambda_\delta + 1/\Lambda_{вш}^ш} \mp H_r L \Lambda_\delta \right) \left(\frac{1}{\Lambda_\delta} + \frac{1}{\Lambda_{вш}^k} \right),$$

где знак минус соответствует положительной поляризации, т. е. поляризующие потоки в рабочем зазоре геркона совпадают по направле-

нию с направлением потока, созданным обмоткой с током, а знак плюс — отрицательной.

13. Рассчитывается коэффициент возврата при управлении герконом обмоткой с током

$$K_B^K = \frac{F_{отп}^K}{F_{ср}^K},$$

где $F_{ср}^K$ и $F_{отп}^K$ — МДС срабатывания, соответствующая зазору $\delta_{ср}$, и МДС отпускания, соответствующая зазору $\delta_{отп}$.

14. Определяются токи $I_{ш}$ при срабатывании и отпуске устройства на герконе, управляемого током в шине, при наличии поляризующего действия постоянного магнита и МДС F обмотки с током и коэффициент возврата $K_B^ш$ для рассматриваемого случая:

$$I_{ш} = \left(Bbh \mp \frac{F}{1/\Lambda_\delta + 1/\Lambda_{вш}^K} \mp H_\Gamma L\Lambda_\delta \right) \left(\frac{1}{\Lambda_\delta} + \frac{1}{\Lambda_{вш}^ш} \right);$$

$$K_B^ш = \frac{I_{ш,отп}}{I_{ш,ср}}.$$

15. Рассчитывается координата r : срабатывания ($r_{ср}$) и отпускания ($r_{отп}$) при управлении герконом полем постоянного магнита при действии поляризующего поля шины с током $I_{ш}$ и МДС F обмотки с током (см. рис. 30.1):

$$r = \sqrt[3]{\frac{V_M}{4\pi} \left(\frac{B_M}{\mu_0 H_M} + 1 \right) \times \sqrt{\left(\frac{H_M}{H_\Gamma} \right)^{2/3} - 1}};$$

$$H_\Gamma = \frac{1}{L\Lambda_\delta} \left(Bbh \mp \frac{F}{1/\Lambda_\delta + 1/\Lambda_{вш}^K} \mp \frac{I_{ш}}{1/\Lambda_\delta + 1/\Lambda_{вш}^ш} \right).$$

Для определения $r_{ср}$ значение H_Γ подсчитывается при $\Lambda_\delta = \Lambda_{ср}$, а для $r_{отп}$ — при $\Lambda_\delta = \Lambda_{отп}$.

16. В некоторых случаях ставится иная задача: подобрать материал постоянного магнита и его размеры, при которых бы обеспечивались заданные координаты срабатывания ($r_{ср}$) и отпускания ($r_{отп}$) или $r_{ср}$ и Δr , где $\Delta r = r_{отп} - r_{ср}$.

В этом случае последовательность расчета будет следующей.

Намечается форма поперечного сечения стержневого постоянного магнита и по ней определяется коэффициент формы K_ϕ поперечного сечения:

для кольца

$$K_\phi = 4\pi(1 - \beta^2) \geq 12,56;$$

для прямоугольника

$$K_\phi = \frac{4(1 + h_M/b_M)^2}{h_M/b_M} \geq 16;$$

для равнобедренного треугольника

$$K_\phi = \frac{4(2a_M/c_M + 1)^2}{\sqrt{(2a_M/c_M)^2 - 1}} = \frac{8(1 + \sin \varepsilon/2)^2}{\sin \varepsilon} \geq 20,8,$$

где $\beta = d/D$ — отношение внутреннего диаметра d к внешнему D ; ε — угол между равными сторонами a_M треугольника, имеющего в сечении основание c_M .

17. Выбирается материал постоянного магнита и по табличным данным подсчитывается магнитный показатель Π :

$$\Pi = B_r/\mu_0 H_c.$$

18. Вычисляются индукции $B_{ср}$ и $B_{отп}$, а также магнитные проводимости $\Lambda_{ср}$ и $\Lambda_{отп}$ (см. п. 4).

19. Рассчитываются объем постоянного магнита и его размеры: длина l_M и сечение S_M :

$$V_M = \frac{4\pi}{\Pi + 1} \sqrt{\left(\frac{3r_{ср} \Delta r}{1 - t} - r_{ср}^2 \right)^3};$$

$$t = \frac{\Lambda_{ср} \left(B_{отп} bh \mp \frac{F}{1/\Lambda_{отп} + 1/\Lambda_{вш}^K} \mp \frac{I_{ш}}{1/\Lambda_{отп} + 1/\Lambda_{вш}^ш} \right)}{\Lambda_{отп} \left(B_{ср} bh \mp \frac{F}{1/\Lambda_{ср} + 1/\Lambda_{вш}^K} \mp \frac{I_{ш}}{1/\Lambda_{ср} + 1/\Lambda_{вш}^ш} \right)};$$

$$l_M = \sqrt[3]{V_M \left(\frac{3\pi\Pi}{3\sqrt{K_\phi} + \sqrt{9K_\phi + 12\pi\Pi}} \right)^2};$$

$$S_M = \sqrt[3]{\left[\frac{V_M (3\sqrt{K_\phi} + \sqrt{9K_\phi + 12\pi\Pi})}{3\pi\Pi} \right]^2}.$$

Если постоянный магнит используется в качестве поляризующего элемента, например, в реле тока или напряжения, то при известном расстоянии r между ним и продольной осью геркона (см. рис. 30.1) и при известном его материале объем V_M постоянного магнита может быть найден по формуле

$$V_M = \frac{4\pi}{\left(\frac{B_M}{\mu_0 H_M} + 1 \right)} \left[\sqrt{\left(\frac{H_M}{H_{\Gamma,ср}} \right)^{2/3} - 1} \right]^3 \approx \frac{4\pi}{\Pi + 1} \frac{H_{\Gamma,ср}}{H_c} r^3 (1 + \sqrt{1 - \alpha}),$$

где α — коэффициент прямоугольности петли гистерезиса материала постоянного магнита.

По найденному сечению S_M и принятому коэффициенту K_ϕ определяются недостающие размеры поперечного сечения постоянного магнита. Например, внешний диаметр D_M стерж-

невого постоянного магнита с выбранным значением β будет равен:

$$D_M = 2 \sqrt{\frac{S_M}{\pi(1-\beta^2)}},$$

а внутренний диаметр составит

$$d_M = \beta D_M.$$

Ширина b_M призматического магнита (см. рис. 30.1) будет равна:

$$b_M = \sqrt{\frac{S_M}{(h_M/b_M)}},$$

и его высота

$$h_M = (h_M/b_M) b_M.$$

Для призматического треугольного магнита с основанием c_M в сечении

$$c_M = 2 \sqrt[4]{\frac{S_M^2}{\left(2 \frac{a_M}{c_M}\right)^2 - 1}},$$

а сторона

$$a_M = \left(\frac{a_M}{c_M}\right) c_M,$$

или, если известен угол ε между равными сторонами,

$$c_M = 2 \sqrt{\frac{S_M}{\lg \varepsilon/2}};$$

$$a_M = 0,5 c_M / \sin \frac{\varepsilon}{2}.$$

После расчета геометрических параметров устройства на герконе необходимо произвести выбор параметров обмотки (шины) управления (число витков N ; диаметр $d_{пр}$ провода обмотки, сечения шины) и оценить тепловой режим ее работы.

20. Определяется рабочая МДС F_p устройства:

$$F_p = K_F K_n F_{ср} = K_3 F_{ср},$$

где $K_F = 1,2 \div 2,0$ — коэффициент запаса по МДС, учитывающий возможные разбросы МДС срабатывания отдельных герконов одного типа, а также колебания питающего напряжения и изменения тока, вызванные вариацией сопротивления обмотки в холодном и нагретом ее состояниях; K_n — коэффициент, учитывающий взаимное влияние друг на друга близкорасположенных герконов, входящих в состав устройства и срабатывающих от одного источника управления:

$$K_n = \sqrt[n]{n},$$

где n — число герконов устройства, управляемых одной обмоткой управления.

Дальнейший расчет зависит от условий работы устройства.

Устройство работает от источника напряжения.

21. Обмотка подключена к источнику большой мощности.

Подсчитывается диаметр d_r провода обмотки:

$$d_r = 2 \sqrt{\frac{F_p \rho_{\tau} (d_v + h_k)}{\pi U}},$$

где ρ_{τ} — удельное электрическое сопротивление материала провода обмотки при допустимой для выбранного класса изоляции установившейся температуре нагрева обмотки; U — напряжение источника питания.

Найденный диаметр d_r округляется до стандартного значения $d_{пр}$, и выбирается марка провода.

Определяется коэффициент $K_{з,м}$ заполнения проводом окна обмотки:

$$K_{з,м} \approx \sqrt[4]{d_{пр}/d_{кр}},$$

где $d_{кр} = 6,75$ мм.

Вычисляется число витков N обмотки:

$$N = 4 K_{з,м} h_k l_k / \pi d_{пр}^2.$$

Производится тепловой расчет обмотки. Установившееся превышение температуры τ_p над температурой окружающей среды равняется:

$$\tau_p = \frac{(d_{пр} U)^2}{4 \pi N K_{то} \rho_{\tau} l_k d_k (d_k + h_k)},$$

где $K_{то}$ — коэффициент теплоотдачи [$K_{то} \approx 10$ Вт/(град·м²)].

Подсчитанное значение температуры τ_p , не должно превосходить допустимого значения $\tau_{доп}$ для выбранного класса изоляции.

22. Обмотка подключена к источнику ограниченной мощности.

В этом случае потребляемый ток не должен превышать некоторого значения $I_{доп}$.

Выбирается потребляемый ток I устройства ($I \leq I_{доп}$) и по нему определяется ожидаемый коэффициент заполнения обмотки

$$K_{з,м} \approx \sqrt[8]{I/I_{кр}},$$

где $I_{кр} \approx 140$ А.

Уточняется коэффициент запаса K_3 :

$$K_3 = K_F K_n = \sqrt{\frac{K_{з,м} U I l_k h_k}{\pi \rho_{\tau} d_k F_{ср}^2}}.$$

Определяется число витков

$$N = K_3 F_{ср} / I.$$

Вычисляется сечение q провода обмотки

$$q = K_3 \pi \rho_{\tau} d_k F_{ср} / U$$

и округляется до стандартного $q_{пр}$.

Тепловой расчет ведется по методике п. 21.

Устройство работает от источника тока

23. Управление обмоткой с током.

Определяется число витков обмотки

$$N = F_p / I,$$

где I — заданное значение тока источника.

Вычисляется диаметр провода

$$d_r = \sqrt{\frac{4 I^2 \rho_{\tau} N}{K_{то} \tau_{доп} l_k}}$$

и округляется до стандартного $d_{пр}$.

Подсчитывается установившееся превышение температуры обмотки над окружающей средой

$$\tau_p = \frac{4NI^2 \rho_{\tau} d_k}{K_{\text{то}} d_{\text{пр}} l_k (d_k + h_k)} \cdot$$

24. Управление шиной с током.

В этом случае выбирается форма шины и расположение геркона относительно нее.

Подсчитывается значение $I_{\text{ш,ср}}$ по п. 14.

Определяется рабочий ток $I_{\text{ш,р}}$ шины:

$$I_{\text{ш,р}} = K_F K_n I_{\text{ш,ср}},$$

и по нему выбирается необходимое сечение шины.

30.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Устройства релейной защиты могут быть реализованы с применением полупроводниковых элементов: диодов, стабилитронов, транзисторов, оптронов, операционных усилителей, интегральных микросхем, элементов серии «Логика-И».

Основой реле тока или напряжения могут служить схемы транзисторных усилителей и реле. Очень удобно в качестве выходного элемента таких схем использовать развязывающее реле на герконах.

На рис. 30.5 приведена схема реле напряжения. Реле может быть как максимальным, так и минимальным. Уставка регулируется смещением и глубиной обратной связи. Реле может работать как на постоянном, так и на переменном токе, если на входе поставить выпрямляющее устройство. Коэффициент возврата реле может достигать до 0,98.

Реле напряжения (или тока) может быть реализовано на двухбазовом диоде (рис. 30.6). Уставка реле регулируется за счет изменения сопротивления плеч делителя напряжения на входе.

Коэффициент возврата реле равен 0,7—0,8. Однако он может быть существенно повышен и доведен почти до единицы (если не ставятся жесткие требования по быстродействию) путем включения конденсатора С.

На рис. 30.7 приведены схемы реле максимального напряжения (а) и минимального напряжения (б) с тиристорами.

Напряжение срабатывания реле максимального напряжения регулируется резисторами делителя в цепи управляющего электрода выходного тиристора, а отпущения — резисторами на входе.

Напряжение срабатывания реле минимального напряжения регулируется изменением соотношения плеч переменного резистора.

Рассмотренные схемы могут выполнять и роль реле тока, если на их вход подавать сигналы, пропорциональные току защищаемой сети.

Полупроводниковые реле частоты (понижения частоты РЧ-1 и повышения частоты РЧ-2) по сравнению с индукционными менее чувствительны к резким колебаниям входного напряжения, имеют большую точность и меньшую температурную погрешность.

Реле РЧ-1 позволяет устанавливать частоту срабатывания ступенчато, через 1 Гц, переключением числа витков дросселя и плавно, в пределах 1 Гц, изменением сопротивления резистора во вторичной цепи входного трансформатора.

Разница между частотой срабатывания и возврата реле не превышает 0,1 Гц. Частота возврата может регулироваться. Реле выполнено на цоколе и в габаритах реле ИВЧ-3; расположение выводов такое же, как и у реле ИВЧ-3. Реле работает на промежуточное реле РП-220 с двумя замыкающими контактами. Номинальное напряжение контролируемой сети переменного тока 100 В. Номинальное напряжение оперативного постоянного тока 110 или 220 В. Диапазон уставок срабатывания составляет 45—50 Гц, а уставок возврата 46—51 Гц. Минимальная разность между частотами срабатывания и возврата не более 0,1 Гц. Изменение частоты срабатывания не превышает 0,2 Гц при изменении напряжения в сети (0,4—1,3) $U_{\text{ном}}$ и 0,3 Гц при (0,2—1,3) $U_{\text{ном}}$. Изменение частоты срабатывания в интервале температур окружающей среды от -20 до $+40$ °C не превышает 0,25 Гц, а в интервале от -40 до $+40$ °C — 0,35 Гц. Уставки по времени срабатывания составляют 0,15; 0,3 и 0,5 с. Потребляемая мощность цепей переменного тока

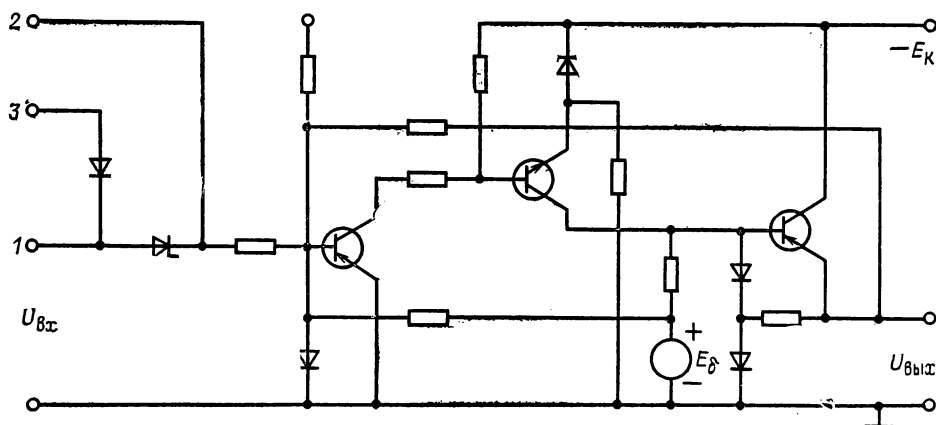


Рис. 30.5. Реле напряжения на транзисторах

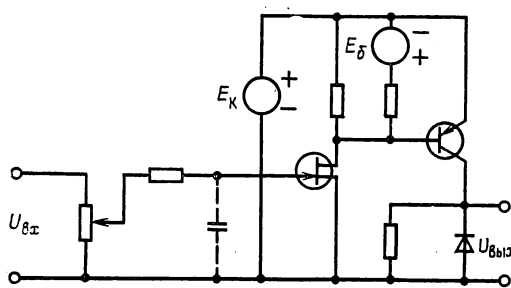
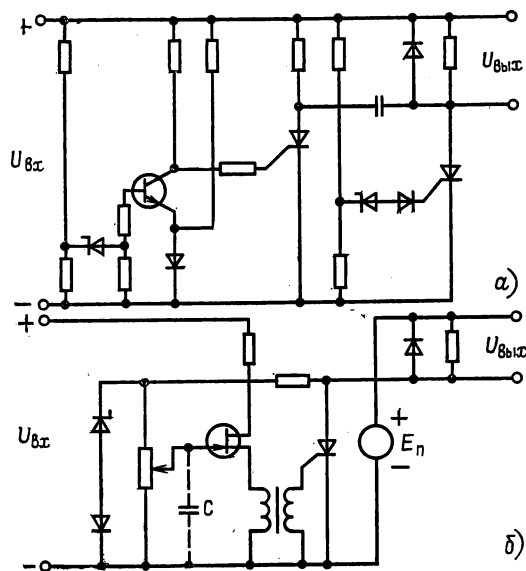


Рис. 30.6. Реле напряжения на двухбазовом диоде

Рис. 30.7. Реле напряжения на тиристорах:
а — максимального напряжения; б — минимального напряжения

не более 10 В·А. Потребление цепей постоянного тока не более 10 Вт при напряжении 110 В и 20 Вт при напряжении 220 В.

Реле повышения частоты РЧ-2 отличается лишь фазочувствительной схемой, в основном оно полностью идентично реле РЧ-1. Диапазон уставок срабатывания и возврата составляет 50—55 Гц. Изменение частоты срабатывания не превышает 0,2 Гц при изменении напряжения в контролируемой сети $(0,6—1,5)U_{ном}$ и не более 0,4 Гц для $(0,2—1,5)U_{ном}$. Время срабатывания не превышает 0,12 с. Остальные технические данные аналогичны данным реле РЧ-1. Цена 2,5 руб.

На базе интегральных микросхем созданы реле защиты и осваиваются комплектные устройства типа ЯРЭ2201, предназначенные для установки в релейный отсек КРУ 6—10 кВ. ЯРЭ2201 пригодно для эксплуатации при температуре от -20 до $+55^{\circ}\text{C}$.

Индивидуальное питание каждого комплекта защиты и автоматики ЯРЭ2201 производится от встроенного устройства питания мощностью 15 Вт.

Реле тока повышенной чувствительности типа РТЗ-51 предназначено для работы совме-

стно с трансформатором тока нулевой последовательности ТТНП в качестве органа, реагирующего на ток нулевой последовательности в схемах защит при замыканиях на землю генераторов, двигателей и линий с малыми токами замыкания на землю. Питание цепей оперативного тока реле производится от источника постоянного тока напряжением 110 или 220 В или же от источника переменного тока напряжением 100 В. Номинальный ток реле 0,1 А. Номинальная частота 50 или 60 Гц. Пределы регулирования тока срабатывания 0,02—0,12 А. Коэффициент возврата реле — не менее 0,93. Время срабатывания реле при двукратном токе срабатывания — не более 60 мс. Реле имеет один замыкающий контакт, способный коммутировать цепи напряжением от 20 до 250 В и током до 2,5 А: 30 Вт в цепи постоянного тока с постоянной времени не более 0,02 с; 250 В·А в цепи переменного тока с коэффициентом мощности не менее 0,4. Мощность, потребляемая на входе реле на минимальной уставке, не более 0,01 В·А. Мощность, потребляемая реле в цепи питания при номинальном напряжении, не превышает 5 В·А на переменном токе в длительном режиме; 5,5 В·А на переменном токе в режиме срабатывания; 10 Вт на постоянном токе. Кратность увеличения тока срабатывания реле на частоте 150 Гц — не менее 4, а на частоте 400 Гц — не менее 15. Масса реле не более 1,5 кг. Цена 36,8 руб.

Реле тока обратной последовательности типа РТФ-8 и РТФ-9 имеют два исполнения: УХЛ4 — для работы при температуре окружающего воздуха от -40 до $+55^{\circ}\text{C}$ и О4 — для работы в пределах от -10 до 55°C .

Реле РТФ-8 предназначено для защиты различных электроустановок при несимметричных коротких замыканиях; РТФ-9 предназначено для защиты генераторов и трансформаторов при несимметричных коротких замыканиях и перегрузке токами обратной последовательности. Номинальная частота реле 50 или 60 Гц. Номинальное напряжение оперативного тока 110 или 220 В. Номинальный ток для РТФ-8 составляет 1 или 6 А, а для РТФ-9 равен 1 или 6 или 10 А. Реле обеспечивают возможность дискретной регулировки уставок на ток обратной последовательности в диапазоне: $(0,3—1,2)I_{ном}$ — для реле РТФ-8, а для РТФ-9 со стороны первого регулирующего органа $(0,04—0,16)I_{ном}$ и $(0,4—1,6)I_{ном}$ — для второго регулирующего органа. Ступень изменения уставок составляет 10 % минимальной уставки; отклонение тока срабатывания от уставки не превышает 10 %. Коэффициент возврата реле не менее 0,95. Потребляемая мощность в номинальном режиме не превышает 0,5 В·А на фазу — в цепях переменного тока; 5,5 Вт для РТФ-8 и 10 Вт для РТФ-9 — от источника оперативного напряжения. Время срабатывания реле РТФ-8 и первого реагирующего органа РТФ-9 при двукратном входном токе срабатывания не более 0,05 с, второго реагирующего органа РТФ-9 — не более 0,045 с. Контакты реле способны коммутировать цепи напряжением от 24 до 250 В и током до 0,5 А: 30 Вт в цепи постоянного тока, постоянная времени которой не превышает 0,005 с. Масса РТФ-8 не более 2 кг, РТФ-9 — не более 2,5 кг. Средняя цена 70 руб.

Реле направления мощности типов РМ11 и

Таблица 30.9. Основные данные реле типов РМ11 и РМ12

Обозначение типоразмера	Характеристический угол Φ_{χ} при $U_{ном}$ и $I_{ном}$
РМ11-11-УХЛ4, РМ11-11-2УХЛ4, РМ11-18-УХЛ4, РМ11-18-2УХЛ4	$-30 \pm 5^\circ$
РМ11-11-104, РМ11-11-204, РМ11-18-104, РМ11-18-204	$-45 \pm 5^\circ$
РМ12-11-УХЛ4, РМ12-11-2УХЛ4, РМ12-11-104, РМ12-11-204, РМ12-18-УХЛ4, РМ12-18-2УХЛ4, РМ12-18-104, РМ12-18-204	$70 \pm 5^\circ$

* Отрицательный характеристический угол — ток опережает напряжение, положительный — ток отстает от напряжения.

** Номинальный ток 1 или 5 А.

РМ12 предназначены для использования в схемах релейной защиты в качестве органа направления мощности; выпускаются в двух исполнениях; УХЛ4 — для работы при температуре окружающего воздуха от -40 до $+55^\circ\text{C}$ и О4 — для работы в пределах от -10 до $+55^\circ\text{C}$. Основные номинальные данные различных типоразмеров реле приведены в табл. 30.9.

Область срабатывания реле по углу сдвига фаз при номинальных токе и напряжении находится в пределах от 165 до 180° . Ток срабатывания реле не превышает значения $0,05 I_{ном}$, если значение входного напряжения находится в пределах утроенного напряжения срабатывания до $1,15 U_{ном}$, а угол между входными величинами равен характеристическому. При 55°C возможно увеличение тока срабатывания до $0,09 I_{ном}$. Напряжение срабатывания реле РМ11 не превышает $0,25 \text{ В}$, если значение входного тока находится в пределах от $0,15 I_{ном}$ до $30 I_{ном}$, а угол между входными величинами равен характеристическому. Напряжение срабатывания реле типа РМ12 регулируется ступенями и имеет значения $1,0 \pm 0,1$; $2,0 \pm 0,2$ или $3,0 \pm 0,3 \text{ В}$ при соответствующих уставках 1; 2 и 3 В, если значение входного тока находится в пределах $0,2$ — $30 I_{ном}$, а угол между входными величинами равен характеристическому. Коэффициент возврата по току (напряжению) при номинальном напряжении (токе) и характеристическом угле для реле РМ11 составляет $0,6$, а для РМ12 — $0,8$ в диапазоне температур от -10 до $+55^\circ\text{C}$ и $0,7$ в диапазоне температур от -10 до $+40^\circ\text{C}$. Реле имеют два выходных канала: с повышенным быстродействием и с повышенной коммутационной способностью. Время срабатывания реле по каналу с повышенным быстродействием не более $0,03 \text{ с}$, а по каналу с повышенной коммутационной способностью — не более $0,05 \text{ с}$ при условиях: для РМ11 — напряжение $0,75 \text{ В}$ и

номинальный ток или $0,15 I_{ном}$ и номинальное напряжение; для РМ12 — $3 U_{ср}$ и $0,15 I_{ном}$. Время возврата реле по каналу с повышенным быстродействием при сбросе входных токов с $I_{ном}$ и с $30 I_{ном}$ и номинального напряжения до нуля не более $0,04 \text{ с}$, время возврата при перемене направления мощности — не более $0,06 \text{ с}$; время возврата по каналу с повышенной коммутационной способностью при сбросе токов и напряжения, указанных выше, и при перемене направления мощности не более $0,07 \text{ с}$. Мощность, потребляемая реле во входных цепях тока при $I_{ном}$, не более $0,5 \text{ В} \cdot \text{А}$; мощность, потребляемая реле во входных цепях напряжения при $U_{ном}$, не более $3 \text{ В} \cdot \text{А}$. Мощность, потребляемая цепями оперативного постоянного тока при номинальном постоянном напряжении, не более 10 Вт . Мощность, потребляемая реле в цепях питания оперативным переменным током и напряжением при их номинальных значениях, в цепях напряжения не более $35 \text{ В} \cdot \text{А}$, в цепях тока — $10 \text{ В} \cdot \text{А}$. Область срабатывания по углу сдвига фаз не превышает 180° ; при трехкратных гарантируемых значениях входного тока и напряжения область срабатывания по углу сдвига фаз не менее 110° . Отклонение характеристического угла при изменении входного тока от $0,5$ - до 10 -кратного номинального и входного напряжения от $3 U_{ср}$ до $1,1 U_{ном}$ не превышает плюс 15° , минус 20° от значений, указанных в табл. 30.9; изменение характеристического угла по отношению к указанному в табл. 30.9 в диапазоне входных токов (10 — 30) $I_{ном}$ не более $\pm 20^\circ$. Изменение характеристического угла при изменении частоты на $\pm 3 \text{ Гц}$ от номинальной — не более $\pm 6^\circ$ по отношению к значению этого угла при номинальной частоте. Минимальный ток контактов при напряжении 24 — 110 В не менее $0,05 \text{ А}$, а при напряжении выше 110 В — $0,01 \text{ А}$; длительно допустимый ток контактов $2,5 \text{ А}$. Коммутационная способность контактов реле по каналу с повышенной коммутационной способностью составляет 30 Вт в цепи постоянного тока с постоянной времени 20 мс при напряжении до 250 В и токе 1 А . Цена реле 70 руб .

Реле разности частот типа РТР11 предназначено для применения в схемах автоматики при синхронизации генераторов, включаемых на параллельную работу. Реле работает при температуре окружающего воздуха от -20 до $+55^\circ\text{C}$ (исполнение УХЛ4) и от -10 до $+55^\circ\text{C}$ (исполнение О4).

Номинальное переменное напряжение — 100 В . Номинальная частота 50 или 60 Гц . Уставки на разность частот срабатывания: для исполнения УХЛ4 — плавная регулировка (первоначальная настройка $0,5 \text{ Гц}$), а для исполнения О4 — от $0,5$ до 4 Гц . Изменение разности частот срабатывания при минимальной (максимальной) уставке не более $\pm 0,5 \text{ Гц}$ ($\pm 0,6 \text{ Гц}$) при изменении синхронизируемого напряжения от $0,02$ до $0,1 U_{ном}$ и номинальном базисном напряжении для реле с номинальной частотой 50 и 60 Гц ; $\pm 0,1 \text{ Гц}$ ($\pm 0,15 \text{ Гц}$) при изменении базисного напряжения от $0,75$ до $1,15 U_{ном}$ и синхронизируемом напряжении, равном $0,1 U_{ном}$ для реле с номинальной частотой 50 или 60 Гц ; $\pm 0,1 \text{ Гц}$ ($\pm 0,35 \text{ Гц}$) для реле с номинальной частотой 50 Гц при изменении частоты базисного и синхронизируемого напряжений на каждые 3 Гц в диапазоне час-

тот от 40 до 60 Гц и номинальных значениях базисного и синхронизируемого напряжений; $\pm 0,15$ Гц ($\pm 0,4$ Гц) для реле с номинальной частотой 50 Гц при изменении частоты базисного и синхронизируемого напряжений на каждые 3 Гц в диапазоне частот от 50 до 70 Гц и номинальных значениях базисного и синхронизируемого напряжений. Мощность, потребляемая реле по цепям базисного и синхронизируемого напряжений, при номинальных значениях напряжений и частоты не превышает соответственно 10 и 5 В·А.

Реле имеет два переключающих выходных контакта; минимальный ток контактов 0,05 А при напряжении от 24 до 110 В и 0,01 А при напряжении выше 110 В; длительно допустимый ток контактов 2,5 А. Масса реле не более 2,5 кг. Цена 100 руб.

Список литературы

- 30.1. Реле защиты/В. С. Алексеев, Г. П. Варганов, Б. И. Панфилов, Р. З. Розенблюм. М.: Энергия, 1976. 464 с.
30.2. ГОСТ 16022-82. Реле электрические. Термины и определения.
30.3. Коробков Ю. С., Умеренков А. С., Шибанов В. К. Устройства на герконах, Учебное пособие

по курсу «Электрические аппараты». М.: МЭИ, 1978. 56 с.

30.4. Коробков Ю. С. Реле на ферридах: Учебное пособие по курсу «Электромеханические аппараты автоматики» М.: МЭИ, 1978. 51 с.

30.5. Буль Б. К., Коробков Ю. С. Ферриды: Учебное пособие по курсу «Электромеханические аппараты автоматики». М.: МЭИ, 1979. 67 с.

30.6. Коробков Ю. С. Расчет магнитоуправляемых контактов. Учебное пособие по курсам «Электрические аппараты» и «Электромеханические аппараты автоматики». М.: МЭИ, 1982. 65 с.

30.7. Устройства автоматики на герконах/Ю. С. Коробков, А. С. Умеренков, В. К. Шибанов. Под ред. Ю. С. Коробкова. М.: МЭИ, 1983. 108 с.

30.8. Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты. М.: Энергия, 1972. 248 с.

30.9. Хвостов А. П. Определение оптимальных геометрических размеров постоянного магнита для магнитогерконного датчика положений. — Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы, вып. 3. Теория, расчет и конструирование герконов, 1977, с. 78—91.

30.10. Электротехника СССР. Аппараты низкого напряжения на герконах. М.: Информэлектро, 1980. 11 с.

30.11. Шопен Л. В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики. М.: Энергия, 1976. 568 с.

30.12. Могилевский Г. В., Райнин В. Е., Гребенник В. И. Полупроводниковые аппараты защиты. М.: Энергия, 1980. 167 с.

30.13. Барзам А. Б., Пояркова Т. М. Лабораторные работы по релейной защите и автоматике. М.: Энергоатомиздат, 1984. 256 с.

30.14. Костерин В. А., Николаев Н. Н., Ярыз Н. А. Статические аппараты релейной защиты. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1983. 44 с.

Раздел 31

ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ, СИСТЕМЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

СОДЕРЖАНИЕ

31.1. Классификация электромагнитов и систем с постоянными магнитами . . .	600
31.2. Методы расчета электромагнитов и систем с постоянными магнитами . . .	601
Расчет электромагнитов с использованием формул для магнитной цепи (601). Расчет систем с постоянными магнитами с использованием формул для магнитной цепи (603). Численные методы расчета магнитных систем со стационарным и квазистационарным полем (604). Расчет сил взаимодействия между элементами магнитных систем (606)	

31.3. Магнитные системы удерживающих механизмов	607
31.4. Магнитные опоры	608
31.5. Синхронные магнитные механизмы	610
31.6. Фокусирующие магнитные системы	611
31.7. Источники магнитного поля для намагничивания и исследования магнитных материалов	612
31.8. Эталонные источники магнитного поля	614
Список литературы	616

31.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ И СИСТЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

При проектировании электромагнитов и систем с постоянными магнитами целесообразна классификация по виду выходного параметра и целевому назначению.

По виду выходного параметра рассматриваемые устройства можно отнести к одной из трех групп:

- 1) воспроизводящие заданную топографию поля в ограниченном объеме;
- 2) создающие заданный магнитный поток в ограниченном объеме;
- 3) обеспечивающие заданный закон изменения или значение силы взаимодействия между механически несвязанными деталями.

По целевому назначению, даже если не учитывать магнитные системы электрических машин и электрических аппаратов, которые рассмотрены в других разделах настоящего справочника, классификация получается довольно обширная. Отметим наиболее крупные области использования электромагнитов и систем с постоянными магнитами.

Магнитные удерживающие механизмы: грузоподъемные механизмы, магнитные плиты, патроны, захваты, магнитные подшипники, опоры.

Синхронные магнитные механизмы: магнитные муфты, редукторы, механизмы поступательного перемещения.

Фокусирующие магнитные системы: электронных, ионных и тому подобных приборов, создающие однонаправленное, реверсивное или периодическое поле.

Магнитные сепараторы и смесители, служащие для отделения ферромагнитных частиц, перемешивания растворов, расплавов и др.

Источники магнитного поля для намагничивания и исследования магнитных материалов, эталонные источники магнитного поля.

Отдельные детали электромагнитов и систем с постоянными магнитами по своему функциональному назначению принадлежат к одной из следующих групп: первичные источники поля; магнитопроводы; концентраторы магнитного потока; регулировочные элементы; стабилизирующие магнитные элементы.

К первичным источникам поля в электромагнитах относятся проводники с током, которые конструктивно выполняются в виде многовитковых катушек и обмоток. В системах с постоянными магнитами в качестве первичных источников поля выступают предварительно намагниченные постоянные магниты. В комбинированных магнитных системах оба вида источников используются совместно.

Магнитопроводы изготавливаются из материалов с высоким значением относительной магнитной проницаемости μ_r , и обеспечивают передачу магнитного потока обычно в нерабочей части систем с минимальными потерями и затратами запасенной в первичных источниках поля энергии.

Концентраторы магнитного потока служат для направления потока и усиления индукции магнитного поля в рабочей зоне устройства и изготавливаются из магнитных материалов с высокой индукцией насыщения B_s , так как значение B_s определяет максимальный предел индукции в рабочей зоне, который возможно достичь при эффективном использовании магнитных материалов и энергии первичных источников поля.

К регулировочным элементам относят как ферромагнитные детали конструкции, так и подстроечные маломощные токовые катушки, которые предназначены для перераспределения магнитного потока и регулирования его уровня в небольших пределах с целью точной установки заданных параметров поля. Положение регулировочных элементов и токи в подстроечных катушках подбираются при юстировке магнитной системы на заключительной стадии ее изготовления.

Стабилизирующие магнитные элементы применяются в магнитных системах для стабилизации или задания необходимого закона изменения магнитного потока при изменении температуры. Для этих целей используются термомангнитные шунты из магнитомягких материалов с сильной зависимостью магнитной проницаемости от температуры, а также постоянные магниты из набора магнитотвердых материалов с различными температурными коэффициентами магнитной индукции.

31.2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ И СИСТЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Независимо от конкретного назначения электромагниты и системы с постоянными магнитами представляют собой источники магнитного поля. Если иметь в виду характер измене-

ния поля во времени, в этих устройствах принято различать стационарные магнитные поля, которые практически неизменны во времени, и квазистационарные поля, скорость изменения которых недостаточна для появления заметного вклада в поле от токов электрического смещения в вакууме и диэлектриках. В свою очередь в стационарных магнитных полях выделяют статическое магнитное поле, созданное только намагниченными ферромагнетиками без проводников с током. Необходимо подчеркнуть, что реально нельзя создать строго неизменное во времени поле, и введенная градация имеет в основе чисто практические соображения. Выбор частотной области существования поля (стационарное, квазистационарное) позволяет сделать первый шаг к построению доступной количественному анализу расчетной математической модели устройства.

Магнитное поле существует в неограниченном пространстве и соответственно создается бесчисленным множеством источников, не только собственно рассматриваемым электромагнитом или системой с постоянными магнитами, но и всеми известными и неизвестными нам другими источниками. Конкретизация пространственного распределения поля, так же как и во времени, связана с принятием различных по степени приближения допущений и необходима при математическом описании поля. Применяются два существенно отличных по степени приближения допущения: из интуитивных соображений задаются упрощенной топографией поля в ограниченной области или исключают из расчета слабо влияющие на поле в исследуемой области источники. В первом случае последующий ряд логически связанных допущений позволяет свести расчет магнитной системы к анализу эквивалентной электрической цепи. Так как расчет электрических цепей легко реализуется, то этот подход до сих пор остается наиболее распространенным, несмотря на невысокую и трудно поддающуюся оценке точность расчета. Во втором случае решается краевая задача теории поля для магнитной системы без учета влияния внешних факторов или с определенным упрощением конструкции самой магнитной системы.

Расчет электромагнитов с использованием формул для магнитной цепи

Схемы электромагнитов приведены на рис. 31.1, 31.2 и включают в качестве основных элементов обмотки, по которым протекает постоянный или переменный электрический ток, магнитопровод, концентраторы магнитного потока, рабочую зону. Выходным параметром электромагнита служит либо топография поля в рабочем зазоре, либо силовая характеристика, которая также является функцией напряженности поля в зазоре. Под расчетом электромагнита понимается определение: 1) обмоточных данных катушки при заданном напряжении или токе имеющегося источника питания; 2) размеров магнитопровода, чаще всего интересует магнитопровод с минимальной массой; 3) размеров концентраторов магнитного потока, которые обеспечивают создание заданных выходных параметров [31.1—31.3].

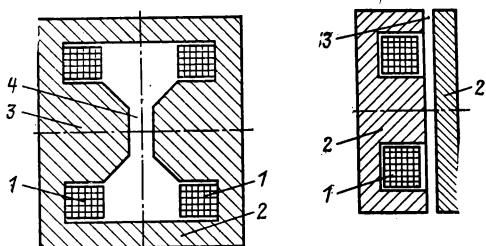


Рис. 31.1.

Рис. 31.2.

Рис. 31.1. Схема электромагнита:

1 — обмотка; 2 — магнитопровод; 3 — концентратор (полюс); 4 — рабочая зона

Рис. 31.2. Схема электромагнита для силового устройства:

1 — обмотка; 2 — магнитопровод; 3 — рабочая зона

1. Определение требуемой МДС

$$F = Iw = kH_{з,ср} l_з,$$

где F — МДС обмотки; I — ток в катушке; w — число витков обмотки (если обмотка состоит из нескольких секций, то — суммарное число витков во всех секциях); $H_{з,ср}$ — заданное среднее значение напряженности поля в рабочей зоне; $l_з$ — длина рабочей зоны по направлению магнитного потока; $k=1,0 \div 1,2$ — коэффициент, учитывающий неидеальность магнитопровода (конечное значение магнитной проницаемости). Оценка k может быть выполнена при известных размерах магнитопровода по соотношению магнитных сопротивлений магнитопровода и воздушного зазора. Однако чаще эти операции выполняются в обратном порядке: сначала задаются коэффициентом k , а затем выбирают требуемое сечение магнитопровода. Большее значение коэффициента k определено из оценки ряда существующих конструкций электромагнитов. При выборе k следует иметь в виду, что потребляемая электромагнитом электрическая активная мощность возрастает пропорционально k^2 .

2. Расчет обмоточных данных. Для обмотки напряжения электромагнита постоянного тока при известном среднем диаметре обмотки определяют сечение или диаметр обмоточного провода по формулам

$$q = \rho l_{ср} \frac{Fk_t}{U}; \quad d = 2 \sqrt{\rho D_{ср} \frac{Fk_t}{U}},$$

где q — сечение обмоточного провода по металлу; d — диаметр обмоточного провода по металлу; ρ — удельное сопротивление материала провода при нормальной температуре нагрева; $l_{ср}$ и $D_{ср}$ — средняя длина и диаметр витков катушки; U — напряжение, приложенное к обмотке; F — требуемая МДС обмотки; k_t — температурный коэффициент увеличения сопротивления обмотки [31.3].

Далее выбирают по рекомендованным значениям плотность тока J_d в проводе и рассчитывают ток I в обмотке:

$$I = J_d q.$$

Допустимая плотность тока J_d зависит от класса изоляции обмотки и температурных условий работы. Ориентировочно можно принять для меди следующие значения: $2 \div 5$ А/мм² — при естественном охлаждении; $6 \div 8$ А/мм² — при принудительном воздушном охлаждении.

По известному току и МДС находят число витков катушки

$$w = F/I.$$

Окно, занятое обмоткой, должно иметь площадь

$$S = q_{из} w / k_з,$$

где S — сечение обмотки; $q_{из}$ — площадь сечения обмоточного провода с изоляцией; $k_з$ — коэффициент заполнения.

По S выбирают длину l и высоту h сечения обмотки (желательно иметь $l > h$) и корректируют выбранный исходный средний диаметр катушки. Если новое значение среднего диаметра заметно отличается от принятого ранее, то следует повторить расчет.

Полная длина обмоточного провода вычисляется по формуле

$$L_{п} = l_{ср} w.$$

Обмотки тока электромагнитов постоянно-го и переменного тока и обмотки напряжения электромагнитов переменного тока рассчитываются в следующей последовательности. Сначала определяется число витков. Для обмоток тока

$$w = F/I_{ном},$$

где $I_{ном}$ — заданный ток обмотки.

Для переменного напряжения

$$w = \frac{\sqrt{2}U}{\omega \Phi_m} = \frac{U}{4,44f\Phi_m},$$

где U — действующее значение напряжения; ω — угловая частота тока; f — частота тока; Φ_m — амплитудное значение магнитного потока, найденное из условия сцепления его со всеми витками обмотки. Необходимо иметь в виду, что расчет по этой формуле дает заниженное значение числа витков из-за наличия электрических и магнитных потерь. Поправочный коэффициент лежит в пределах $0,7 \div 0,98$ в зависимости от конструктивного выполнения электромагнита [31.1].

Сечение провода для обмоток тока определяется по допустимой плотности тока для заданного температурного режима по (31.3). У обмоток напряжения электромагнитов переменного тока сечение провода определяется найденным числом витков и известным сечением окна для обмотки

$$q = \frac{Q_0 k_з}{w}; \quad d = 2 \sqrt{\frac{Q_0 k_з}{\pi w}},$$

где Q_0 — площадь сечения обмотки.

Проверка по нагреву осуществляется по двум параметрам: по допустимой плотности тока и по условиям теплоотдачи.

Для кратковременного режима работы допустимая плотность тока

$$J_d = \sqrt{\frac{c\delta}{\rho} \frac{\vartheta_d}{T_в}},$$

где c — удельная теплоемкость материала провода; δ — плотность материала; ρ — удельное сопротивление; ϑ_d — допустимое превышение температуры (перегрев) обмотки; T_b — время включенного состояния.

Установившийся перегрев обмотки

$$\vartheta = \frac{\rho k_a}{\alpha_T} J^2 \frac{Q_0}{p},$$

где α_T — коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки (усредненный); p — периметр сечения обмотки.

Методы проверки обмоток на нагрев по условиям теплоотдачи базируются на формуле Ньютона

$$\vartheta = \tau \frac{P}{\alpha_T S_{охл}},$$

где P — потребляемая активная мощность; $S_{охл}$ — поверхность охлаждения;

$$\tau = \begin{cases} 1 & \text{— для продолжительного режима работы;} \\ 1 - \exp(-T_b/T) & \text{— для кратковременного режима;} \\ [1 - \exp(-T_b/T)]/[1 - \exp(-T_{ц}/T)] & \text{— для повторно-кратковременного режима;} \end{cases}$$

T — период; $T_{ц}$ — время цикла.

3. Расчет сечения магнитопровода. Расчеты магнитопроводов осуществляются из условий достижения минимальных потерь магнитного потока при прохождении его от одного до другого полюса электромагнита в нерабочей зоне в заданных геометрических и массогабаритных ограничениях.

У электромагнитов постоянного тока (напряжения) конфигурация магнитопровода выбирается на основе анализа конструктивных ограничений, связанных с размещением их в разрабатываемом устройстве, требований обеспечения доступа к рабочей зоне и т. п. Во всех случаях необходимо стремиться к минимальной длине магнитопровода, чтобы снизить магнитные потери. Важным ограничивающим фактором представляется соотношение проводимостей между полюсами и между полюсом и магнитопроводом. При уменьшении длины магнитопровода неизбежно увеличивается поток рассеяния на него с полюса и соответственно уменьшается рабочий поток. При известной длине магнитопровода его сечение рассчитывается по принятому уровню падения магнитного напряжения в магнитопроводе

$$\Delta U_m = (k - 1) F,$$

где ΔU_m — падение магнитного напряжения в магнитопроводе, включая полюсы электромагнита.

Средний уровень напряженности поля в магнитопроводе

$$H_{ср,м} = \Delta U_m / L_{ср,м},$$

где $L_{ср,м}$ — средняя длина магнитопровода с полюсами.

Сечение магнитопровода

$$S_m = \mu_0 H_{а,ср} S_a \sigma / B_{ср,м},$$

где S_a — сечение рабочего зазора электромагнита; σ — коэффициент рассеяния магнитного потока в рабочем зазоре (см. ниже); $B_{ср,м}$ — средняя индукция в магнитопроводе, которая определяется по магнитной характеристике материала при расчетном значении $H_{ср,м}$.

Приведенные приближенные формулы для расчета сечения магнитопровода тем точнее, чем меньше насыщение материала и выше его магнитная проницаемость.

Магнитопроводы у электромагнитов переменного тока выполняются шихтованными из тонких листов электротехнической стали. Кроме того, для уменьшения потерь на перемагничивание выбирают марки стали с минимальными удельными потерями на гистерезис. При толщине листа $2a$ мощность потерь на вихревые токи на единицу площади листа выражается формулой

$$P_a = \frac{2a^2 k^3 B_{ср}^2 [\operatorname{sh}(2ka) - \sin(2ka)]}{\gamma \mu_0^2 \mu_r [\operatorname{ch}^2(ka) - \cos^2(ka)]},$$

$$\text{где } k = \sqrt{\frac{\omega \gamma \mu_0 \mu_r}{2}};$$

γ — электрическая проводимость стали.

Потери на перемагничивание в единице объема ферромагнитного материала

$$P_m = f \int_{-B_m}^{B_m} H dB \approx 4f H_c B_r,$$

где f — частота перемагничивания, $f < 1000$ Гц; B_m — амплитуда индукции перемагничивающего поля; B_r — остаточная индукция материала; H_c — коэрцитивная сила по индукции.

Концентраторы магнитного потока. Эффект концентрирования магнитного потока в рабочей зоне электромагнита существует за счет высокой магнитной проницаемости концентратора по отношению к окружающей среде и имеет место только до достижения индукции насыщения материала B_s . Поэтому уровень поля в зазоре определяет выбор материала концентратора. Чаще всего при разработке электромагнитов стремятся к получению предельных уровней полей и используют материалы для концентраторов с максимальными индукциями насыщения. Предельное значение индукции в рабочем зазоре, при котором электромагнит работает в экономичном режиме, составляет B_s концентратора. Существенное значение для выбора формы концентратора имеет угол скоса, который определяет соотношение потоков рассеяния и рабочего, а следовательно, при заданном рабочем потоке и суммарный поток в магнитопроводе.

Расчет систем с постоянными магнитами с использованием формул для магнитной цепи

Систему, состоящую из постоянных магнитов, магнитомягкой арматуры и воздушных зазоров, часто рассчитывают с использованием приближенного метода — метода отношений (метод Эвершеда—Пику) [31.2], когда магнитная цепь приводится к двухузловой эквивалентной электрической схеме с сосредоточен-

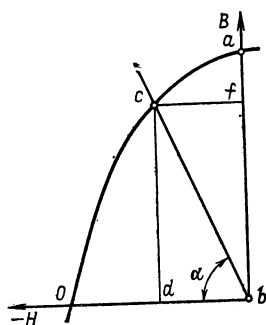


Рис. 31.3. К расчету систем с постоянными магнитами с использованием формул для магнитной цепи

ными нелинейными параметрами. При этом обычно принимается линейное распределение магнитного потенциала вдоль магнита и используется графоаналитический метод расчета. Порядок расчета иллюстрирует рис. 31.3, где изображена кривая размагничивания магнита (Oa) и характеристика внешней по отношению к постоянному магниту проводимости g системы (прямая bc). Пересечение характеристик — точка c — определяет состояние материала магнита, называемое рабочей точкой, которая имеет координаты: по индукции — отрезок bf и по напряженности поля — отрезок bd . Если магнитное состояние магнетомягких элементов системы таково, что можно приближенно принять постоянство магнитной проницаемости во всем интервале изменения H , то внешняя проводимость системы $g = \text{const}$ и линия bc — прямая, проходящая под углом α

$$\text{tg } \alpha = \frac{B_{p, \tau}}{H_{p, \tau}} = \frac{\Phi l_m}{FS_m} = g \frac{l_m}{S_m},$$

где $B_{p, \tau}$ и $H_{p, \tau}$ — индукция и напряженность поля рабочей точки магнита; Φ — магнитный поток, создаваемый магнитом; F — МДС магнита; S_m — сечение магнита; l_m — длина магнита.

Магнитный поток складывается из рабочего потока и потока рассеяния $\Phi = \Phi_{\text{раб}} + \Phi_{\text{рас}}$, соответственно $g = g_{\text{раб}} + g_{\text{рас}}$. Площадь прямоугольника $bdcf$ пропорциональна энергии магнитного поля $W = \Phi F / 2 = (\Phi_{\text{раб}} + \Phi_{\text{рас}}) F / 2$ вне магнита.

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = \frac{W}{W_{\text{раб}}} = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{раб}}} = \frac{g}{g_{\text{раб}}}.$$

Магнитное напряжение $U_m = H_{p, \tau} l_m$ падает на внешнем участке магнитной цепи.

Основную трудность при расчетах методом отношений представляет определение магнитных проводимостей, для которых имеются различные приближенные формулы [31.2, 31.3].

При определении суммарной проводимости с боковой поверхности магнита на основании допущения о линейном распределении потенциала вдоль магнита в значение проводимости вводится коэффициент 0,5.

Для магнитных систем, у которых магнит намагничивается без магнитной арматуры, необходимо учитывать, что рабочая точка находится не на кривой размагничивания, а на пря-

мой возврата (см. § 16.1) и расчет производится в два этапа: сначала по предельной кривой размагничивания для уединенного магнита, а затем по прямой возврата для магнита с арматурой.

Численные методы расчета магнитных систем со стационарным и квазистационарным полем

В современных условиях расчет сложных магнитных систем может и должен производиться с минимальными допущениями на ЭВМ. Последние годы усилению разрабатывается программное обеспечение ЭВМ, которое позволяло бы учитывать реальную сложную, часто трехмерную конфигурацию деталей и весь диапазон существующих магнитных характеристик. Базой для построения таких программ является формулировка краевой задачи теории поля.

Широко известны три универсальных численных метода решения краевых задач: метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и метод интегральных уравнений (МИУ).

Формулировка краевой задачи для стационарного магнитного поля. В условиях стационарного магнитного поля уравнения Максвелла имеют следующий вид:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}; \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0.$$

Так как индукция не имеет истоков, то всегда допустимы обозначения $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$, где $\mathbf{A}$ — векторный магнитный потенциал, и для $\mathbf{A}$ из первого уравнения Максвелла с учетом магнитной характеристики получаем нелинейное дифференциальное уравнение

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}.$$

В области магнитной системы, в которой нет сторонних токов, $\nabla \times \mathbf{H} = 0$ и $\mathbf{H} = -\nabla \phi$, где ϕ — скалярный магнитный потенциал. Используя второе уравнение Максвелла, получаем дифференциальное уравнение для ϕ

$$\nabla (\mu_0 \mu_r \nabla \phi) = 0.$$

На границах раздела разнородных сред справедливы условия непрерывности нормальных к границе составляющих вектора индукции и касательных составляющих напряженности поля

$$n \mathbf{B}_{\text{вт}} = n \mathbf{B}_{\text{вп}}; \quad n \times \mathbf{H}_{\text{вт}} = n \times \mathbf{H}_{\text{вп}},$$

где $\mathbf{n}$ — единичная нормаль к поверхности.

Квазистационарное электромагнитное поле. При анализе переменного электромагнитного поля выделяют квазистационарную частотную область, когда поле токов электрического смещения пренебрежимо мало по сравнению с магнитным полем токов проводимости. В этих условиях справедлива система уравнений Максвелла

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}; \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t,$$

где $\mathbf{J} = \mathbf{J}_v + \mathbf{J}_{\text{ст}}$ — в общем случае сумма плотностей наведенного вихревого и стороннего тока; $\mathbf{E}$ — вектор напряженности электрического поля. К этой системе необходимо добавить

уравнения непрерывности линий магнитной индукции и полного тока

$$\nabla \mathbf{B} = 0; \quad \nabla \mathbf{J} = 0,$$

которые определяют условия на границе раздела разнородных сред. Для векторного магнитного потенциала из уравнений Максвелла следует дифференциальное уравнение

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu_0 \gamma (\partial \mathbf{A} / \partial t) = -\mu_0 \nabla \times \mathbf{M}$$

при условии $\nabla \mathbf{A} = -\mu_0 \gamma \Phi_e$, Φ_e — скалярный электрический потенциал.

Если γ и μ_r — постоянны и возбуждающее поле синусоидально, то $\mathbf{A}$ удовлетворяет уравнению Гельмгольца для комплексных значений векторов

$$\nabla^2 \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = 0,$$

$$\text{где } k^2 = -j\omega\mu_0\mu_r\gamma; \quad \nabla \mathbf{A} = -\mu_0 \mu_r \gamma \Phi_e.$$

Напряженность электрического поля связана с векторным магнитным потенциалом соотношением

$$\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t + \nabla \mathbf{A} / (\mu_0 \gamma)$$

или

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} + \nabla \mathbf{A} / (\mu_0 \mu_r \gamma).$$

На границе разнородных в магнитном или электрическом отношении областей справедливы условия непрерывности векторов:

$$n\mathbf{B}_{\text{вн}} = n\mathbf{B}_{\text{вн}}; \quad n \times \mathbf{H}_{\text{вн}} = n \times \mathbf{H}_{\text{вн}};$$

$$n\mathbf{J}_{\text{вн}} = n\mathbf{J}_{\text{вн}}; \quad n \times \mathbf{E}_{\text{вн}} = n \times \mathbf{E}_{\text{вн}}.$$

Метод конечных разностей (МКР). Основная идея состоит в конечно-разностной аппроксимации дифференциального уравнения в частных производных и последующем решении полученной системы нелинейных алгебраических уравнений с ленточной матрицей [31.4]. На все исследуемое пространство накладывается сетка и по значениям параметра поля в ее узлах строится разностный аналог дифференциальных операторов, что приводит к системе алгебраических уравнений относительно искомого параметра поля. Для анализа поля в нелинейной ферромагнитной среде удобнее использовать интегральный аналог уравнений Максвелла.

Из условия $\nabla \mathbf{B} = 0$ имеем

$$\frac{1}{\Delta V_j} \int_{S_j} \mathbf{B} d\mathbf{S} \approx \frac{1}{\Delta V_j} \sum_{i=1}^N B_i \Delta S_i = 0.$$

При подстановке в это равенство функций $\mathbf{B} = f(\mathbf{H})$, задающих магнитные свойства материала, и применении конечно-разностной аппроксимации градиента скалярного потенциала на узлах сетки

$$\mathbf{H} = -\nabla \Phi \approx \|\mathbf{A}\| \|\Phi\|,$$

где $\|\mathbf{A}\|$ — матрица постоянных коэффициентов; $\|\Phi\|$ — матрица узловых значений потенциалов; получаем систему алгебраических уравнений

$$\sum_{i=1}^N \Phi_{ji}(U_{ji}) = 0,$$

где $\Phi_{ji}(U_{ji}) = f(\|\mathbf{A}\| \|\Phi\|) \Delta S_{ji}$ — поток через поверхность ΔS_{ji} i -й ячейки, образующей j -й объем ΔV_j .

Если область немагнитная, то

$$\Phi_{ji} = \|\mathbf{A}_j\| \|\Phi_j\| \Delta S_{ji}.$$

При использовании МКР в разнородных средах возникает необходимость «сшивания» на границах, которое производится последовательным решением внутренних и внешних задач с использованием условий непрерывности векторов поля на границе раздела разнородных сред до получения установившихся значений параметров поля. Кроме того, в МКР существует проблема внешней границы области исследований, так как этот метод требует построения сетки во всей области существования поля. Ограничение области осуществляется введением искусственной границы, на которой определяются граничные значения параметров поля в процессе итерационного решения.

Метод конечных элементов (МКЭ) базируется на том, что искомая непрерывная функция аппроксимируется дискретной моделью, построенной на множестве простейших функций в конечном числе подобластей. Этот метод относится к вариационно-сеточному методу, состоящему в удовлетворении интегральному тождеству для рассматриваемой краевой задачи на выбранном множестве кусочно-полиномиальных функций [31.5]. Вся область исследования разбивается на ячейки (треугольные, четырехугольные и т. п.), в пределах которых распределение функции аппроксимируется простейшим полиномом независимо от соседних ячеек. Требуемая гладкость распределения функции в области обеспечивается только за счет наличия у смежных ячеек общих узлов и общих значений функций в этих узлах. В результате поэлементного способа аппроксимации функций расчетные матрицы в МКЭ оказываются слабо заполненными, а вычислительные программы достаточно просты.

С математической точки зрения МКЭ представляет собой обобщение метода Рунге—Рунца—Галеркина, где пробные функции кусочно-полиномиальны. Точность приближения повышается не как в классическом методе Рунца за счет использования более сложных пробных функций, а за счет более мелкого разбиения области с сохранением того же порядка полинома, что и прежде.

В качестве интегрального тождества используются различные энергетические функционалы, обеспечивающие удовлетворение функций исходным дифференциальным уравнением краевой задачи и граничным условиям. Например, для стационарного поля часто принимают

$$F = \int_V \left(\int_0^B \mathbf{H} d\mathbf{B} \right) dV - \int_V \mathbf{A} \mathbf{J} dV.$$

Алгоритм расчета по МКЭ включает следующие этапы:

1. Формулировка краевой задачи в терминах дифференциальных уравнений.
2. Разбиение области исследования на конечные элементы.
3. Выбор интерполяционного полинома для отдельного элемента и получение кусочно-непрерывной функции, определенной во всей области.

4. Выбор и обоснование интегрального тождества и составление системы уравнений, обеспечивающей выполнение интегрального тождества.

5. Решение системы уравнений относительно узловых значений функций.

6. Расчет необходимых параметров поля.

Сравнение МКЭ с МКР показывает преимущества МКЭ, состоящие в простоте расчета распределения поля в телах, составленных из нескольких материалов с различными свойствами. Сложная криволинейная область сравнительно просто аппроксимируется с помощью прямолинейных элементов или описывается более точно криволинейными элементами. Не представляет труда изменение шага сетки элементов в областях с повышенными градиентами H . Принципиальным недостатком МКЭ, как и МКР, представляется необходимость введения сетки и проведения расчетов во всей области.

Метод интегральных уравнений (МИУ) наиболее широко используется в настоящее время при анализе магнитных полей [31.6]. Уравнения весьма разнообразны, но их объединяет то, что краевая задача формулируется в виде интегральных уравнений относительно источников поля, распределенных в ограниченном пространстве: ферромагнитные детали, проводники с током, границы исследуемой области. Математическая основа метода — теория потенциала, дающая однозначную трактовку краевой задачи в интегральной и дифференциальной постановках. Так как уравнения строятся относительно источников, а не искоемых параметров поля, то расчет выполняется в два этапа: сначала определяют источники, а затем интересующие нас параметры поля. Различают два подхода к составлению интегральных уравнений: методы граничных интегральных уравнений (ГИУ); методы пространственных интегральных уравнений (ПриУ).

Методы ГИУ более частные по отношению к ПриУ и подразумевают определенную идеализацию области исследования, например постоянство магнитной проницаемости ферромагнитных деталей. Последнее позволяет определить топографию поля через некоторые фиктивные источники: простые и двойные слои зарядов, токов, магнитных моментов, распределенные только по границам разнородных деталей. Такие источники играют роль «вторичных» по отношению к «первичным» источникам: проводникам со сторонним током и постоянным магнитам. Задача сводится к решению системы интегральных уравнений Фредгольма второго или первого рода, получаемых из краевых условий и записанных относительно поверхности векторных или скалярных, комплексных для синусоидальных полей источников:

$\zeta + \lambda_1 A_1(\zeta) = f_1$ — уравнение второго рода
либо

$\lambda_2 A_2(\xi) = f_2$ — уравнение первого рода,

где ζ, ξ — фиктивные источники поля; λ_1, λ_2 — постоянные коэффициенты, определенные свойствами границащих сред; A_1, A_2 — линейные интегральные операторы, действующие на границах разнородных сред и границе области исследования.

Методы ПриУ используются там, где не удается обойти источники на границах раздела разнородных сред и должны быть введены объемные источники. Такая ситуация возникает при учете реальных нелинейных свойств ферромагнитных материалов. ПриУ записываются относительно физически определенных величин: вектора намагниченности M , плотности вихревого и стороннего тока J , электрических зарядов σ и также могут иметь вид уравнений второго и первого рода, например, система ПриУ для квазистационарного поля:

$$B = A_1(M) + A_2(J);$$

$M = f(B)$ — характеристика материала;

$$J = \lambda_1 \frac{\partial}{\partial t} [A_3(J) + A_4(M)] + \lambda_1 A_7 \sigma;$$

$$\sigma = \lambda_2 \frac{\partial}{\partial t} [A_5(J) + A_6(M)] + \lambda_2 A_8 \sigma,$$

где A_1 – A_6 — линейные интегральные операторы, действующие в объеме магнитных и проводящих сред; A_7, A_8 — линейные интегральные операторы, действующие на границах раздела деталей с различными электрическими проводимостями; λ_1 и λ_2 — постоянные коэффициенты, определяемые электрической проводимостью сред.

Для стационарных магнитных полей остаются только первые два уравнения.

Решение ГИУ и ПриУ осуществляется сведением к системам алгебраических уравнений путем замены интегралов конечными суммами и последующим применением прямых или итерационных методов решения.

В интегральных методах расчета весомым преимуществом выступает то, что решается система уравнений меньшей размерности, чем в МКР и МКЭ, но она имеет полностью заполненную матрицу и вычисление коэффициентов требует интегрирования. Последнее несколько осложняет расчет и вычислительный алгоритм.

Эффективность использования численных методов расчета во многом зависит от квалификации разработчиков программ для ЭВМ. В настоящий момент совершенствование программ является весьма актуальной задачей.

Расчет сил взаимодействия между элементами магнитных систем

При расчетах по цепным схемам замещения силы взаимодействия R удобно определять по энергетической формуле как производную энергии магнитного поля W по условному малому перемещению одной из взаимодействующих групп деталей

$$R_l = -dW/dl.$$

Магнитная цепь состоит из источника МДС F , магнитного сопротивления до рабочего зазора $r_{м,вз}$ и далее двух параллельно включенных сопротивлений [зазора $r_{м,з}$ и рассеяний $r_{м,рас}$ (рис. 31.4)]. Поэтому

$$R_l = - \frac{dW}{dr_{м,з}} \frac{dr_{м,з}}{dl_3},$$

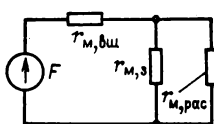


Рис. 31.4. Схема замещения магнитной цепи при расчете сил взаимодействия

где $W = 0,5 F^2 / [r_{м,вн} + r_{м,з} r_{м,рас} / (r_{м,з} + r_{м,рас})]$, а магнитные сопротивления $r_{м,рас}$ и $r_{м,вн}$ считаются неизменными.

Для более точных расчетов сил используется интегральная формула

$$R = \mu_0 \int_{S_r} [(nH) H - 0,5 n H^2] dS,$$

где интегрирование производится по поверхности, охватывающей одну из взаимодействующих групп деталей. Если поле сосредоточено на небольших участках внутри малых воздушных зазоров, то из последней формулы следует простая приближенная формула

$$R \approx \frac{B_z^2}{2\mu_0} S_z,$$

где B_z — индукция в зазоре; S_z — площадь поперечного сечения зазора (площадь полюса).

31.3. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ УДЕРЖИВАЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ

Магнитные удерживающие механизмы нашли широкое применение во многих областях промышленного производства для захвата грузоподъемными устройствами, фиксации на обрабатывающих станках, транспортировки и пр. изделий из ферромагнитных материалов [31.7]. Для этих целей используются электромагниты постоянного или переменного тока (с последующим выпрямлением), а также различные конструкции с постоянными магнитами с шунтированием магнитного потока или управлением импульсными токовыми катушками.

Электромагниты грузоподъемных устройств (рис. 31.5) состоят из корпуса 1, выполняющего функции магнитопровода и изготовленного из стали с высокой магнитной проницаемостью и высокой механической прочностью, обмотки электромагнита 2, которая крепится герметично в корпусе при помощи немагнитной шайбы 3. Конструктивно электромагниты выпускают круглыми, вытянутыми прямоугольными, двухполюсными в зависимости от целевого назначения.

Для улучшения магнитного контакта с неровными поверхностями и соответственно уве-

личения силы притяжения полюсы электромагнита снабжаются «плавающими» ферромагнитными башмаками.

Исходными для расчета является сила притяжения (грузоподъемность устройства), эквивалентный воздушный зазор между полюсами электромагнита и притягиваемой деталью, магнитные свойства детали. Так как в рабочем состоянии электромагнита потоки рассеяния не велики, то расчеты с достаточной точностью производятся с использованием цепных схем замещения.

На рис. 31.6 изображено устройство для удержания листовых магнитных материалов,

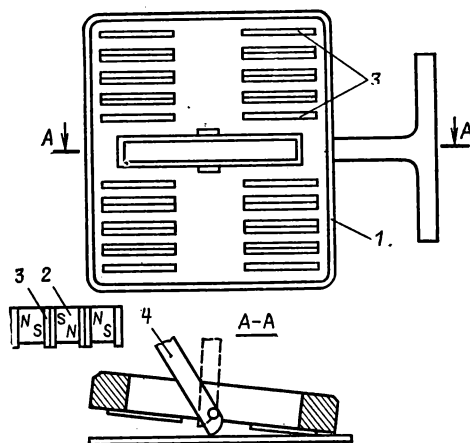


Рис. 31.6. Устройство на постоянных магнитах для удержания листовых магнитных материалов

построенное на постоянных магнитах. Устройство имеет корпус 1 из немагнитного материала, где заключено несколько постоянных магнитов 2, расположенных рядами. Постоянные магниты разделены полюсными наконечниками 3 из магнитомягкого материала, к которым они крепятся одноименными полюсами и заливаются в корпусе пластическим материалом. Расцепление устройства с грузом осуществляется при помощи рычага 4.

Материал для постоянных магнитов у такого устройства должен обладать высокой коэрцитивной силой, так как магнит работает на частном цикле, причем точка отхода от кривой размагничивания определяется в системе без груза при большом собственном размагничивающем поле.

Удерживающее устройство на постоянных магнитах с использованием магнитного шун-

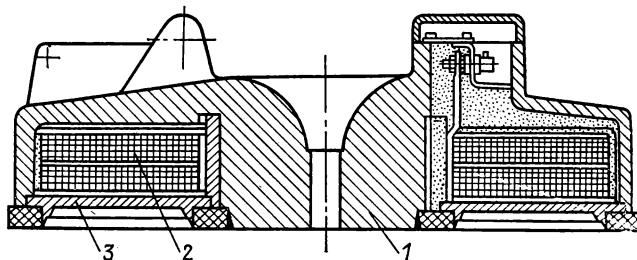


Рис. 31.5. Электромагнит грузоподъемного устройства

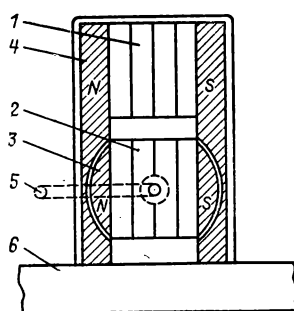


Рис. 31.7. Удерживающее устройство с магнитным шунтированием

тирования для расцепления с грузом показано на рис. 31.7. Оно состоит из неподвижного магнита 1, подвижного магнита 2 с магнитомягкими полюсами сегментной формы 3, магнитомягких полюсов 4 с сегментными проточками и рычага 5, которым производится поворот магнита 3. На рисунке изображено рабочее положение магнита 2. При повороте на 180° магнит 2 шунтирует поток магнита 1 и груз 6 к полюсам не притягивается.

Устройство аналогичного назначения показано на рис. 31.8. Два постоянных магнита 1 и 2 вместе с наружными полюсами 3 и внут-

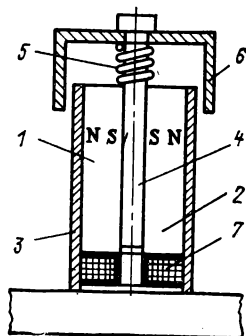


Рис. 31.8. Удерживающее устройство с электромагнитным шунтированием

ренним полюсом 4 образуют магнитную систему. Внутренний полюс в нерабочем состоянии удерживается в поднятом положении пружиной 5 на немагнитной крышке 6. Для притягивания груза полюс 4 опускается и приходит в соприкосновение с грузом. Для отпущения груза используется обмотка 7, по которой пропускается импульс тока, создающий магнитный поток обратного направления к потоку постоянных магнитов. После этого внутренний полюс под действием пружины переходит в верхнее положение. В такой конструкции важно выбрать параметры импульса тока так, чтобы он не приводил к размагничиванию постоянного магнита.

На рис. 31.9 изображено удерживающее устройство на постоянных магнитах, где для управления притягиванием и отпущением используется перемагничивание магнита импульсом тока в катушке. Устройство имеет два кольцевых постоянных магнита 4, 9, которые крепятся между двумя полюсными наконечниками 3, 10 из магнитомягкой стали с помощью немагнитных винтов 5. На каждый постоянный магнит одеты на каркасах 6 обмотки возбуждения 2. Защита обмоток от повреждений осуществляется немагнитными листами 1, 7, 8.

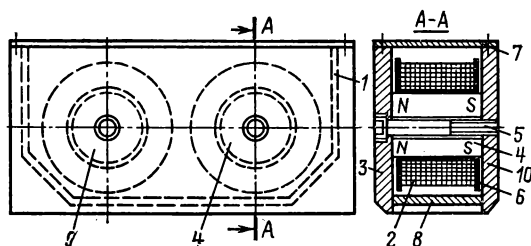


Рис. 31.9. Удерживающее устройство на постоянных магнитах, управляемое с помощью перемагничивания

Для захвата устройство опускается на груз, затем через катушки 2 пропускается импульс постоянного тока, так чтобы намагнитить до насыщения постоянные магниты 4 и 9. Магнитные потоки отпущения магнитов замкнутся через груз, и он притянется. Для отпущения груза магнитный поток гасится путем перемагничивания одного из магнитов импульсом тока обратного направления.

31.4. МАГНИТНЫЕ ОПОРЫ

Автоматическое управление током электромагнитов как функции взаимного положения подвижных частей позволяет создавать высокоэффективные электромагнитные опоры и подшипники. На рис. 31.10 изображена *радиальная электромагнитная опора*, где в качестве активных элементов выступают четыре электромагнита с Ш-образными сердечниками 1 и обмотками 2, расположенными симметрично по окружности в немагнитной оправке 4. Жестко закрепленная оправка с электромагнитами помещена в стакан 3 из магнитомягкого материала, который с помощью немагнитного диска 5 скреплен с подвижной частью опоры 6.

Принцип действия заключается в следующем. При радиальном смещении появляется сигнал с датчика положения и подается ток в обмотки электромагнитов со стороны, противоположной направлению перемещения. За счет сил магнитного притяжения стакан со скрепленным с ним удерживаемым устройством возвращается в центральное положение.

Существенным преимуществом электромагнитных опор представляется возможность регулирования жесткости (производной силы по

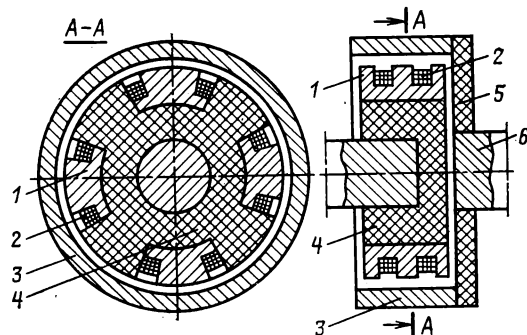


Рис. 31.10. Радиальная электромагнитная опора

перемещению) изменением тока, а также возможность независимого построения радиальных и осевых опор. Последнее вызывает большие трудности при использовании постоянных магнитов в магнитоэлектрических опорах.

Осевая электромагнитная опора (рис. 31.11) состоит из двух кольцевых магнитопроводов 1, в пазах которых помещены обмотки 2.

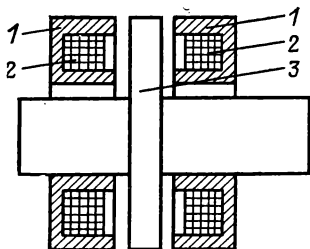


Рис. 31.11. Осевая электромагнитная опора

На валу устройства жестко закреплен диск 3 из магнитомягкого материала, расположенный в центре зазора между симметричными секциями электромагнита. При смещении вала вдоль оси подается ток в обмотку, от которой удаляется диск 3. Возникающий магнитный поток замыкается по магнитопроводу и диску, и появляется сила, действующая в противоположную сторону от смещения. Вал возвращается в исходное положение. Питание обмоток электромагнита осуществляется от источника, управляемого сигналами датчиков положения.

Радиальные магнитоэлектрические подшипники. Существует большое многообразие предложений по построению магнитных опор и подшипников на постоянных магнитах. На рис. 31.12 приведена конструкция радиального магнитоэлектрического подшипника, состоящая из намагниченных по радиусу кольцевых магнитов 1—3 из высококоэрцитивного материала, армированных тонкими кольцевыми концентраторами магнитного потока из магнитомягкого материала 4—9. Центральная секция закреплена на валу 10 удерживаемого устройства, а боковые крепятся к корпусу и неподвижны. Магнитные потоки, созданные постоянными магнитами, замыкаются в малых зазорах между боковыми поверхностями концентраторов.

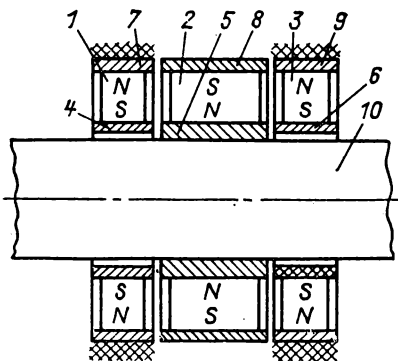


Рис. 31.12. Радиальный магнитоэлектрический подшипник

В симметричном положении результирующая сила на центральную секцию равна нулю. При радиальном смещении в зазорах возникают радиальные составляющие индукции, которые вызывают нескомпенсированную радиальную силу притяжения, возвращающую подшипник в исходное симметричное положение. Такая конструкция обладает высокой жесткостью к радиальным смещениям, однако является неустойчивой к осевым смещениям, так как малые осевые смещения приводят к образованию осевых сил, действующих в направлении смещения.

Несколько меньшей осевой неустойчивостью обладает конструкция, изображенная на рис. 31.13. Подшипник состоит из комбинации кольцевых постоянных магнитов с осевым 1—6 и радиальным 7—10 намагничиванием. За

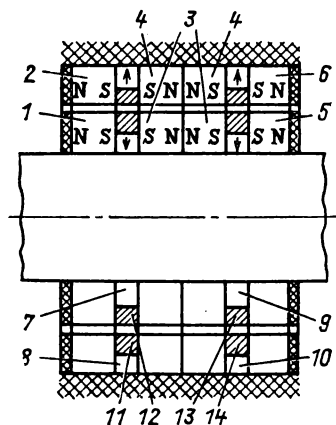


Рис. 31.13. Радиальный магнитоэлектрический подшипник с улучшенной осевой устойчивостью

счет колец из магнитомягкого материала 11—14 улучшается линейность силовых характеристик. В отличие от рассмотренного выше этот подшипник работает не на силах притяжения, а на силах отталкивания, которые возникают при радиальных смещениях вала вместе с внутренней облойкой магнитов. Магнитоэлектрические подшипники на отталкивание имеют меньшую радиальную жесткость, чем подшипники, работающие на притяжение, но у них существенно ниже паразитные осевые усилия.

Осевой магнитоэлектрический подшипник с магнитомягким ротором. Хорошие результаты получены при проектировании работающих на притяжение осевых магнитоэлектрических подшипников с магнитомягким ротором. На рис. 31.14 показан подшипник, состоящий из двух намагниченных встречно кольцевых постоянных магнитов 1, 2 с осевой поляризацией. Магниты снабжены концентраторами потока 3—5 из магнитомягкого материала с заостренными зубцами. Магнитомягкий вал 7 также имеет заостренные проточки, расположенные в плоскости концентраторов. Внешняя часть магнитной системы закреплена в неподвижном немагнитном корпусе 6. Магнитные потоки, созданные постоянными магнитами, замыкаются через концентраторы и вал, образуя высокую индукцию поля в зазоре между зубцами. В симметричном положении все силы скомпен-

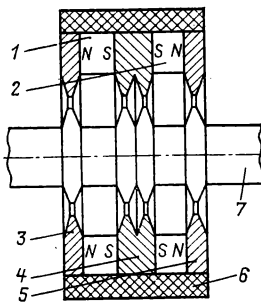


Рис. 31.14. Осевой магнитостатический подшипник с магнитомягким ротором

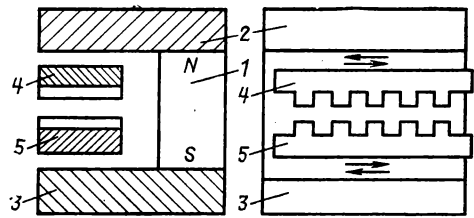


Рис. 31.16. Магнитный механизм поступательного перемещения

сированы. При осевом смещении возникает осевая сила в обратном направлении.

При разработке оптимальных конструкций силовых магнитных устройств в первую очередь необходимо стремиться к получению максимального значения индукции в рабочих зазорах, которое определяется индукцией насыщения материала концентратора. Этот вывод следует из теоретического анализа силовых взаимодействий в магнитных полях: усилие пропорционально квадрату индукции и прямо пропорционально площади поверхности, разделяющей взаимодействующие части.

31.5. СИНХРОННЫЕ МАГНИТНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Синхронные магнитные механизмы служат для передачи механической энергии бесконтактным способом посредством сил магнитного взаимодействия, возникающих при прохождении магнитного потока через ферромагнитные элементы механизма [31.3]. Практически все механические схемы механизмов могут быть выполнены бесконтактно с использованием сил магнитного притяжения. На рис. 31.15 изображена *радиальная магнитная муфта*, у которой магнитный поток создается кольцевым постоянным магнитом 1, армированным зубчатыми дисками 2 и 3 из магнитомягкого материала. Магнит закреплен на валу 5. На валу 6 крепится магнитомягкий стакан 4 с зубчатой насечкой на внутренней поверхности с шагом, соответствующим шагу зубцов на дисках. Между зубчатыми поверхностями существует воздушный зазор, достаточный для установки герметизирующих кожухов, экранов и т. п. Передача механической энергии вращения осуществляется за счет сил притяжения между зубцами дисков и стакана, возникающих при их угловом смещении друг относительно друга.

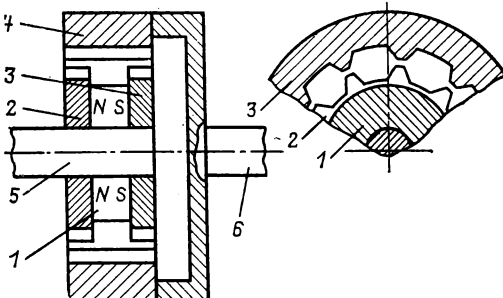


Рис. 31.15. Радиальная магнитная муфта

В магнитной муфте вместо магнита может быть использована обмотка с током. Источник магнитного поля (постоянный магнит, обмотку) в различных конструкциях располагают как на ведущем, так и на ведомом валу, а также в неподвижном состоянии вне муфты.

Магнитный механизм поступательного перемещения с внешним расположением источника поля показан на рис. 31.16. Он имеет постоянный магнит 1 с полюсными магнитомягкими наконечниками 2, 3. В зазоре между наконечниками, где сосредоточена основная часть магнитного потока постоянного магнита, помещены ведомая и ведущая зубчатые рейки 4, 5 механизма, выполненные из магнитомягкого материала. В зазоре между зубцами реек концентрируется магнитное поле, за счет которого при небольших взаимных смещениях реек в направлениях, показанных стрелками, возникают удерживающие магнитные силы и дальнейшее перемещение реек происходит синхронно.

Примеры конструкций *редукторных магнитных механизмов* (червячного и цилиндрического) приведены на рис. 31.17 и 31.18. От соответствующих механических устройств они отличаются воздушным зазором между ведущим и ведомым узлами и наличием источников магнитного поля.

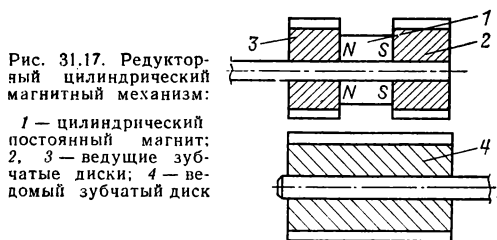


Рис. 31.17. Редукторный цилиндрический магнитный механизм:

1 — цилиндрический постоянный магнит; 2, 3 — ведущие зубчатые диски; 4 — ведомый зубчатый диск

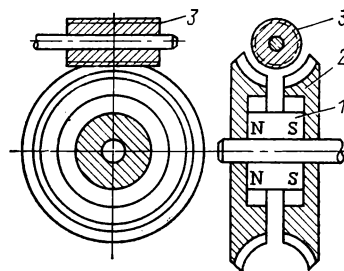


Рис. 31.18. Редукторный червячный магнитный механизм:

1 — постоянный магнит; 2 — зубчатые диски; 3 — червяк

31.6. ФОКУСИРУЮЩИЕ МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ

Система с постоянными магнитами ступенчатого типа для фокусировки электронных пучков вакуумных приборов в однонаправленном поле показана на рис. 31.19. Она состоит из

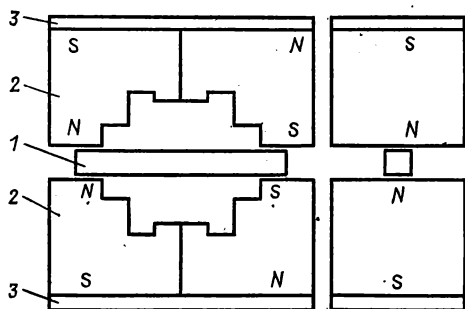


Рис. 31.19. Фокусирующая система ступенчатого типа

протяженного рабочего зазора, в который помещается прибор 1, окруженный ступенчатыми магнитами 2 из высококоэрцитивного сплава. Левая и правая часть магнита намагничены в противоположные стороны в ортогональном к оси зазора направлении. Магниты с внешней стороны армированы пластинами магнитопроводов 3 из магнитомягкого материала. Внутренний ступенчатый профиль магнитов и их высота рассчитываются таким образом, чтобы обеспечить заданный уровень и однородность поля. С помощью электромагнита подобная задача решается использованием соленоида, армированного магнитопроводом и внутренними полюсами на торцах (рис. 31.20). При создании однородных полей часто используют скобообразные наконечники из магнитомягкого материала, как показано на рис. 31.21, 31.22.

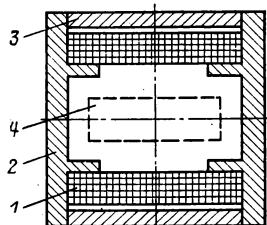


Рис. 31.20. Электромагнитная фокусирующая система с протяженной рабочей зоной:
1 — обмотка электромагнита; 2 — торцевые полюсы; 3 — магнитопровод; 4 — рабочая зона

Это позволяет достичь необходимого эффекта без профилирования магнитов, что оказывается более технологичным.

На рис. 31.22 изображен электромагнит с подвижными боковыми частями скобообразного полюса для регулирования уровня однородности поля в зазоре. Характерная регулировочная кривая приведена на рис. 31.23.

Недостаток однонаправленных систем с постоянными магнитами — в малом абсолютном уровне поля, который ограничивается большой длиной зазора. Принимая во внимание, что фокусирующий эффект сохраняется при изме-

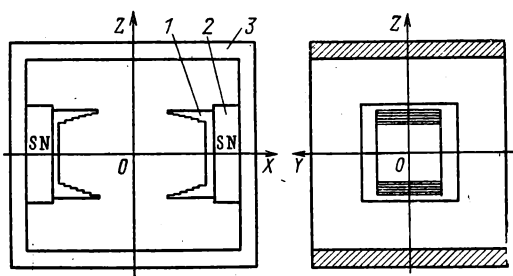


Рис. 31.21. Фокусирующая система с постоянными магнитами со скобообразными наконечниками:
1 — наконечники; 2 — постоянные магниты; 3 — магнитопровод

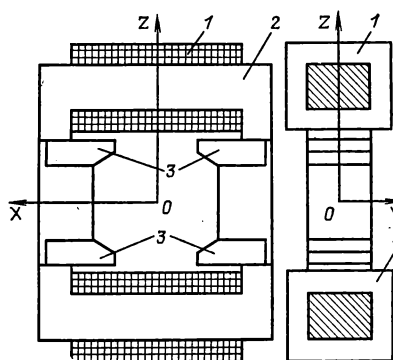


Рис. 31.22. Электромагнит с подвижными полюсами:
1 — обмотки электромагнита; 2 — магнитопровод; 3 — подвижные полюсы

нения направления вектора напряженности поля на противоположное, уровень поля удается повысить за счет использования реверсных и периодических систем.

На рис. 31.24 изображена магнитная периодическая фокусирующая система. Она состоит из ряда чередующихся полярностью кольцевых постоянных магнитов с осевой намагниченностью. Между магнитами вставляются магнитомягкие кольцевые полюсы. Регулируя соотношение размеров полюсов, добиваются необходимого закона распределения поля по оси.

Характерная магнитная система для удержания плазмы в установке ионного распыления показана на рис. 31.25. Постоянные магниты 1 создают магнитный поток, замыкающийся

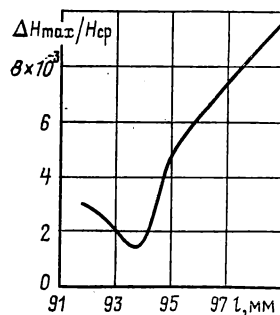


Рис. 31.23. Регулировочная зависимость для электромагнита с подвижными полюсами

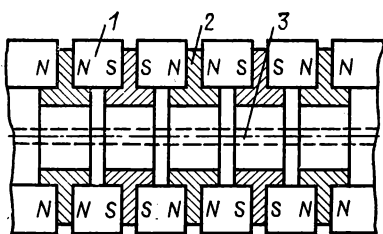


Рис. 31.24. Магнитная периодическая фокусирующая система:

1 — постоянные магниты; 2 — полюсные наконечники;
3 — рабочая зона

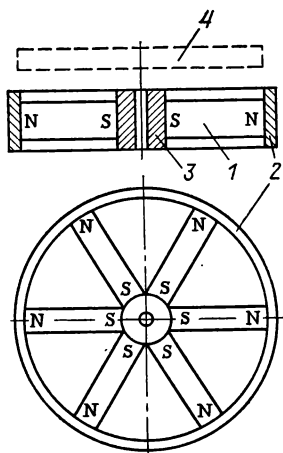


Рис. 31.25. Магнитная система для удержания плазмы

ся от внешнего кольцевого полюса 2 к внутреннему цилиндрическому полюсу 3, захватывая большую область над системой 4, где должна удерживаться плазма.

31.7. ИСТОЧНИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При испытании магнитных материалов требования к источнику магнитного поля сводятся к получению необходимого значения максимальной напряженности поля при минимальном потреблении электроэнергии и определенной однородности его в рабочем зазоре.

Как правило, источниками магнитного поля служат соленоиды — катушки с током и электромагниты (ЭМ) — катушки, в которых в качестве усилителя магнитного потока используются сердечники из ферромагнитных материалов. Следует учитывать тот факт, что магнитная индукция насыщения ферромагнетиков ограничена (около 2,5 Тл). Тем не менее с использованием ферромагнитных материалов можно получить магнитные поля напряженностью примерно до 5000 кА/м, оптимизируя конструкцию магнитной цепи и используя концентрацию магнитного потока в межполюсном зазоре. Так, в настоящее время уже существуют электромагниты, позволяющие получать поля напряженностью 3500—4000 кА/м, достаточные для намагничивания до насыщения

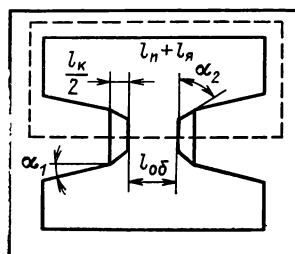


Рис. 31.26. Магнитная цепь электромагнита для испытания материалов

большинства существующих магнитных материалов [31.9, 31.10].

Наиболее подходящими материалами для магнитопроводов ЭМ являются ферромагнетики с большим значением намагниченности насыщения и малой коэрцитивной силой. Поэтому в существующих ЭМ широко используются низкоуглеродистые электротехнические стали.

Магнитную цепь ЭМ для испытания магнитных материалов можно представить в виде трех участков (рис. 31.26): рабочий зазор, длина и сечение которого равны длине $l_{об}$ и сечению $S_{об}$ испытуемого образца; участок длиной l_k и сечением S_k , где происходит концентрация магнитного потока (полюсные наконечники); ярмо и полюсы ЭМ длиной $l'_я = l_я + l_a$ и сечением $S_я$.

Выражение для магнитного потока приведенной цепи ЭМ без учета потоков рассеяния можно представить в виде

$$\Phi = \frac{\omega I}{\frac{l_{об}}{\mu_{об} S_{об}} + \frac{l_k}{\mu_{ак} S_k} + \frac{l'_я}{\mu_{ая} S_я}} = \frac{\omega I}{\frac{l_{об}}{\mu_{об} S_{об}}} \left(1 + \frac{l_k S_{об} \mu_{об}}{l_{об} S_k \mu_{ак}} + \frac{l'_я S_{об} \mu_{об}}{l_{об} S_я \mu_{ая}} \right)^{-1}.$$

Так как при достижении насыщения обычно $\mu_{об} \approx 1$ и $\mu_{ак} \approx 1$, то, подставляя $\Phi_{об} = S_{об} B_{об}$ и $B_{об} = \mu_{об} H$, получим

$$H = \frac{\omega I}{l_{об}} \left(1 + \frac{l_k S_{об}}{l_{об} S_k} + \frac{1}{\mu_{ая}} \frac{l'_я S_{об}}{l_{об} S_я} \right)^{-1}.$$

Разложив в ряд последнее выражение и ограничившись его первым членом, получим

$$H = H_0 - H_0 \left(\frac{l_k S_{об}}{l_{об} S_k} + \frac{1}{\mu_{ая}} \frac{l'_я S_{об}}{l_{об} S_я} \right),$$

где $H_0 = \omega I / l_{об}$ — напряженность магнитного поля, развиваемая МДС ωI в зазоре.

Анализ данного выражения и экспериментальное исследование влияния конусности концентраторов и полюсов на эффект концентрации магнитного потока (рис. 31.27) показали:

Т а б л и ц а 31.1. Данные некоторых отечественных электромагнитов

Тип электромагнита	Форма ярма	Материал ярма	Диаметр полюсного наконечника, мм	Длина рабочего зазора, мм	Сопротивление обмоток, Ом	Потребляемая мощность, кВт·А	Охлаждение	Габариты, мм ³	Масса, кг	Напряженность поля, кА/м
Электромагнит МГУ ФЛ-1 [31.11]	П-образная	Железо-армко	25—100	0—100	16	3	Естественное	426×625×1160	900	2000 в зазоре 12 мм
Электромагнит АН СССР [31.11]	Кубическая	То же	20—58	10—80	4	1,6	Водяное	400×810×870	600	3000 в зазоре 10 мм
Электромагнит НИИЧМ [31.14]	Цилиндрическая	» »	22—100	6—60	1,68	4,2	Естественное	830×830×800	3500	4000 в зазоре 6 мм
Электромагнит МЭИ ЭМ-1 [31.10]	То же	Сталь 3	30—50	3—20	8	1,7 в импульсе	То же	248×248×440	65	2400 в зазоре 4 мм
Электромагнит МЭИ ЭМ-2 [31.10]	» »	То же	30	5—30	8,5	5 в импульсе	» »	395×395×585	205	2800 в зазоре 6 мм
Электромагнит МЭИ ЭМ-3 [31.10]	» »	» »	20	5—30	3	30 в импульсе	Водяное	515×850×900	650	4000 в зазоре 6 мм
Электромагнит установки У5056	О-образная	» »	—	4—100	—	1,5	Естественное	1000×1200×800	400	1500 в зазоре 5 мм

для электромагнитов с максимальной напряженностью поля до 1200 кА/м магнитная система выбирается с $I_k=0$, материал полюсов берется с большой индукцией насыщения, конусность полюсов делается небольшой, так как ее роль состоит только в компенсации влияния рассеяния потока на магнитное состояние материала по длине полюса;

для электромагнитов с максимальной напряженностью поля до 2400 кА/м вводится концентрация магнитного потока ($I_k>0$), выбор I_k и S_k требует более глубокого анализа топографии поля на этом участке, что возможно осуществить с использованием ЭВМ [31.10], угол конусности α_2 концентраторов находится в пределах 30—80°;

для электромагнитов с максимальной напряженностью поля выше 2400 кА/м требуемые значения достигаются, кроме концентрации потока, в основном за счет увеличения МДС путем увеличения числа витков намагничивающих катушек или увеличения плотности тока последних с использованием принудительного охлаждения;

для обеспечения ненасыщения полюсов и ярма, т. е. малого магнитного сопротивления, магнитное состояние материала должно соответствовать области кривой намагничивания с $\mu_{\text{тах}}$, угол конусности полюсов α_1 находится в пределах 15—30°;

наиболее рациональной конструкцией ярма является конструкция панцирного типа, она создает осевую симметрию магнитного потока и позволяет свести к минимуму его рассеяние, служит хорошим экраном магнитного поля.

В табл. 31.1 приведены основные данные о параметрах и конструкции некоторых электро-

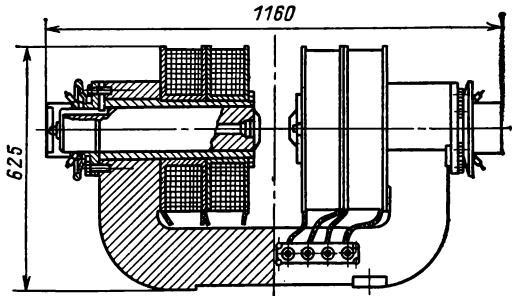


Рис. 31.28. Конструкция электромагнита МГУ ФЛ-1

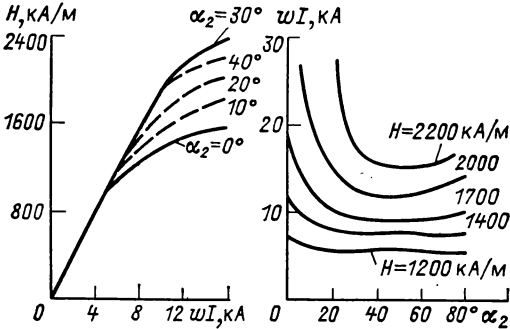


Рис. 31.27. Зависимости напряженности поля в зазоре электромагнита при различных значениях угла конусности наконечников

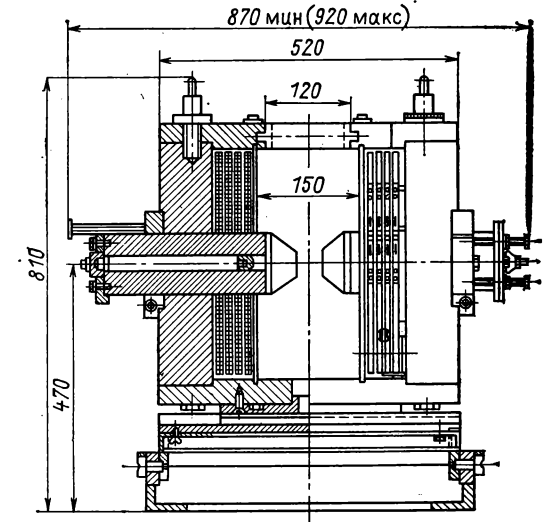


Рис. 31.29. Конструкция электромагнита АН СССР

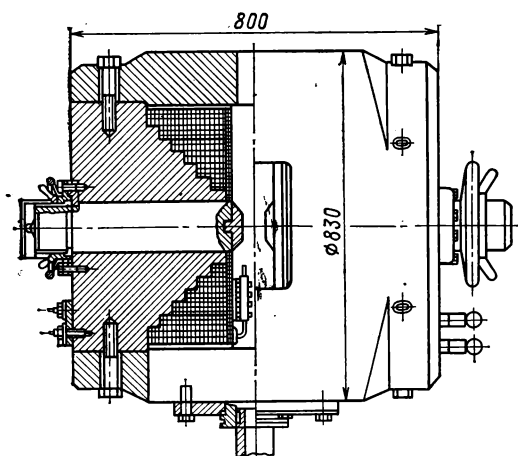


Рис. 31.30. Конструкция электромагнита НИИЧМ

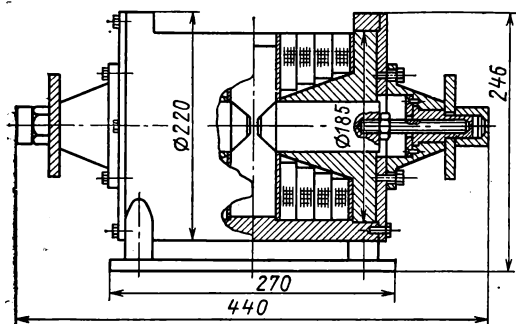


Рис. 31.31. Конструкция электромагнита МЭИ ЭМ-1

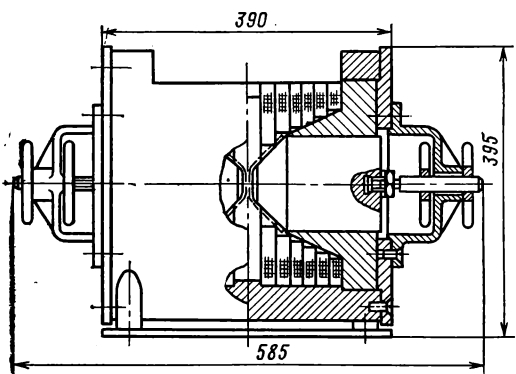


Рис. 31.32. Конструкция электромагнита МЭИ ЭМ-2

магнитов отечественного производства, находящихся в эксплуатации. На рис. 31.28—31.34 приведено конструктивное исполнение указанных электромагнитов.

31.8. ЭТАЛОННЫЕ ИСТОЧНИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Необходимость создания и измерения магнитных полей в широком диапазоне магнитных индукций (от 10^{-12} до 50 Тл) выдвигает

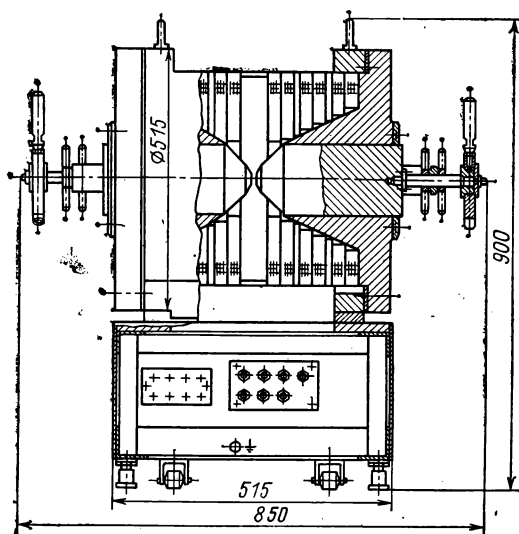


Рис. 31.33. Конструкция электромагнита МЭИ ЭМ-3

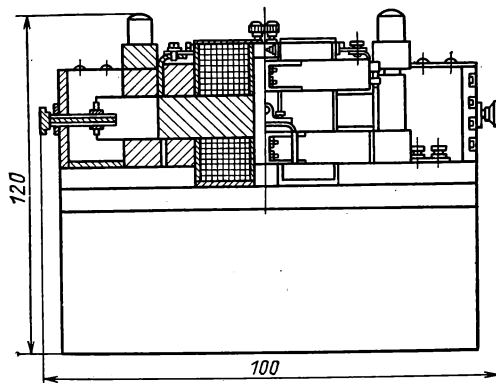


Рис. 31.34. Конструкция электромагнита установки У5056

задачу разработки эталонных источников магнитного поля — мер магнитной индукции различных типов. Основными требованиями к эталонным источникам магнитного поля являются: обеспечение заданной магнитной индукции и стабильности ее, обеспечение высокой однородности поля в заданном объеме, минимальные погрешности воспроизведения определенной магнитной индукции. В некоторых случаях требуется точное значение направления магнитной оси.

В зависимости от величины магнитной индукции эталонные источники магнитного поля выполняются в виде соленоидов и электромагнитов.

Для создания относительно слабых полей (до 2 мТл) высокой однородности широкое распространение получили системы из соосных кольцеобразных секций, а именно системы типов Гельмгольца, Максвелла, Баркера и Гаррета (рис. 31.35). Рекомендации по геометрическим соотношениям к расположению намагничивающих колец для получения высокооднородного поля приведены в табл. 31.2.

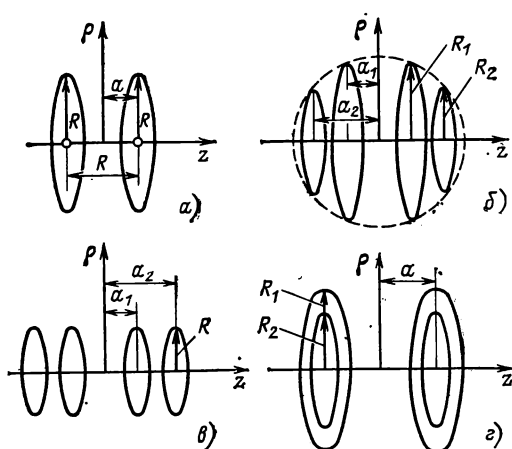


Рис. 31.35. Системы соосных кольцеобразных секций для создания слабых полей высокой однородности

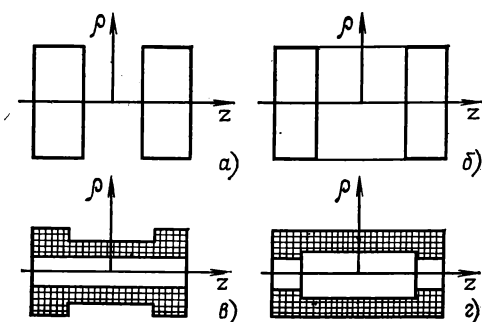


Рис. 31.36. Системы соленоидов для создания магнитных полей высокой однородности

Для получения полей с магнитной индукцией до 30 мТл широко применяются тонкостенные соленоиды. Однородность поля обеспечивается увеличением длины обмотки соленоида. Часто для повышения однородности поля применяют различного рода корректирующие катушки или разбиение обмотки на секции. Примерами могут служить соленоиды Гельмгольца и Гаррета (рис. 31.36, а, б).

Получение полей с магнитной индукцией более 0,02 Тл требует увеличения толщины обмоток. Часто используют при построении та-

ких систем конструкции катушек Жерара—Соада и Монтомери (рис. 31.36, в, г).

Следует учитывать, что увеличение магнитной индукции сопровождается чрезмерным нагреванием обмоток и механическим давлением, что приводит к необходимости принудительного охлаждения и механического упрочения обмоток.

В последние годы появились разработки источников сильного однородного магнитного поля, основанных на использовании сверхпроводимости и работающих при температуре жидкого гелия. Такие разработки позволяют получать поле с магнитной индукцией до 50 Тл. Примером может служить катушка Жерара—Соада, помещенная в гелиевый криостат. В рабочем пространстве поддерживается комнатная температура, магнитная индукция составляет 5 Тл.

Подробное описание методик конструирования, технологии изготовления катушек, вопросов охлаждения, прочности приведено, например, в [31.11, 31.12].

При построении эталонных источников сильных магнитных полей высокой однородности широко используют электромагниты.

Ниже приводятся описания и основные характеристики эталонных источников магнитной индукции постоянного и переменного поля.

Государственный первичный эталон единицы магнитной индукции представляет собой набор трех эталонных катушек на кварцевом основании с постоянными $0,576409 \cdot 10^{-4}$; $1,15487 \cdot 10^{-4}$ и $7,53825 \cdot 10^{-4}$ Тл/А. Две катушки выполнены в виде колец Гельмгольца с числами витков 10 и 20 в каждой секции. Третья катушка выполнена в виде тонкостенного соленоида с разрывом обмотки в центральной части для повышения однородности магнитного поля. Катушка имеет по 159 витков в каждой секции и намотана медным проводом диаметром 0,78 мм в предварительно вырезанные канавки на кварцевом каркасе. Диаметр последнего составляет 300 мм. Провод пропущен через калиброванный алмазный фильер, номинальный шаг намотки 1,2 мм. Технология обработки каркаса и намотки провода обеспечивает высокую точность и термостабильность параметров катушек. Номинальный ток катушек составляет 1 А с нестабильностью $2 \cdot 10^{-6}$ А/мин. Для компенсации магнитного поля Земли применена специальная катушка диаметром 600 мм с нестабильностью тока питания ее 0,001 % в час. Катушка установлена своей магнитной осью по направлению магнитной индукции поля Земли. Для передачи единицы магнитной индукции в эталоне используется ядерно-прецессионная установка. Погрешность воспроизведения теслы имеет систематическую составляющую на уровне $3,9 \cdot 10^{-6}$, случайную — $5 \cdot 10^{-8}$ [31.13]. Эталон хранится во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева.

Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции для диапазона 0,1—1,2 Тл представляет собой электромагнит. Однородное магнитное поле в зазоре последнего создается с помощью специальных межполюсных вставок. Рабочие поверхности вставок отшлифованы до получения плоскости с точностью до 0,3 мкм. Соосность обеспечивается помещением полюсных наконечников в латунную

Т а б л и ц а 31.2. Геометрическое соотношение расположения колец различных систем

Система	Число колец	Соотношение размеров	Рис. 31.36
Гельмгольца	2	$a/R = 1/2$	а
Максвелла	4	$R_2/R_1 = 0,6719$; $a_1/R_1 = 0,2976$; $a_2/R_2 = 0,7600$; $w_2/w_1 = 0,6821$	
Баркера	4	$a_1/R = 0,2432$; $a_2/R = 0,9407$; $w_2/w_1 = 2,2606$	б
Гаррета	4	$R_2/R_1 = 0,2652$; $a/R_1 = 0,4347$; $w_2/w_1 = 0,02453$	в
			г

трубу с вырезом для доступа в рабочее пространство, при этом обеспечивается параллельность полюсов до 1 мкм. Стабильность магнитного поля обеспечивается двойной системой стабилизации: стабилизации тока питания на магнитизирующих катушках и стабилизации магнитной индукции в зазоре межполюсных вставок путем сравнения измеренной величины с опорной. Сигнал рассогласования в виде разности частот прецессии протонов ядерного тесламетра и стабилизированного генератора подается после усиления на регулировочные катушки электромагнита. Описанный источник воспроизводит магнитную индукцию в диапазоне 0,094—1,22 Тл с систематической погрешностью 10^{-5} и случайной $—3 \cdot 10^{-6}$. Эталон хранится в ХГНИИМ [31.14].

Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции для диапазона 2—10 Тл представляет собой сверхпроводящую катушку магнитного поля со стабилизированным источником тока.

Эталонный источник поля обеспечивает воспроизведение магнитной индукции с систематической погрешностью 10^{-5} и случайной $3 \cdot 10^{-5}$. Для воспроизведения магнитной индукции с указанной точностью используются тесламетр на основе ЯМР и установка контроля тока сверхпроводящей катушки [31.15].

Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции переменного поля представляет собой катушку-соленоид с кусочно-переменной плотностью намотки. Витки катушки уложены в канавки, проточенные на цилиндрическом кварцевом каркасе. Центральная часть обмотки имеет 82 витка с шагом намотки 4,8 мм; две боковые части имеют по 21 витку с шагом намотки 1,6 мм. Расчетная постоянная катушки составляет $2,460 \cdot 10^{-4}$ Тл/А, неоднородность поля в объеме сферы радиусом 240 мм не превосходит 0,01 %. Описанный эталонный источник магнитного поля обеспечивает воспроизведение значения магнитной индукции в частотном диапазоне от 1 до 10 000 Гц с систематической погрешностью $3 \cdot 10^{-4}$ и случайной $2 \cdot 10^{-4}$. Для обеспечения указанной точности воспроизведения магнит-

ной индукции в эталоне используется компенсационная установка типа УПМИ-1 с индукционными (в диапазоне 20—10 000 Гц) и феррозондовыми (в диапазоне 1—20 Гц) первичными преобразователями. Эталон хранится во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева [31.16].

Список литературы

- 31.1. Бугаев Г. А. Расчет обмоток электромагнитных механизмов. М.: Отделение ВНИИЭМ по научно-технической информации в электротехнике, 1970. 19 с.
- 31.2. Постоянные магниты: Справочник/А. Б. Альтман, А. Н. Гербергер, П. А. Гладышев и др.; Под ред. Ю. М. Пятин. — М.: Энергия, 1980. 448 с.
- 31.3. Гинзбург Л. Б., Федотов А. И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов. Справочник. Л.: Машиностроение, 1980. 364 с.
- 31.4. Расчет электротехнических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ/М. Г. Александрова, А. Н. Белянин, В. Брюкнер и др.; Под ред. Л. В. Данилова и Е. С. Филиппова. М.: Радио и связь, 1983. 344 с.
- 31.5. Норри Д., де Фрид Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. 304 с.
- 31.6. Курбатов П. А., Аринчин С. А. Численный расчет электромагнитных полей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 168 с.
- 31.7. Калинин В. С., Фейлер Г. О. Подъемные электромагниты. М.: Металлургиздат, 1962. 88 с.
- 31.8. Шихин А. Я. Автоматические магнитоизмерительные системы. М.: Энергия, 1977. 136 с.
- 31.9. Испытания магнитных материалов и систем/Е. В. Комаров, А. Д. Покровский, В. Г. Сергеев, А. Я. Шихин; Под ред. А. Я. Шихина. М.: Энергоатомиздат, 1984. 376 с.
- 31.10. Чечерников В. И. Магнитные измерения. М.: Изд-во МГУ, 1969. 387 с.
- 31.11. Карасик В. Р. Физика и техника сильных магнитных полей. М.: Наука, 1964. 347 с.
- 31.12. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.
- 31.13. ГОСТ 8.095-81. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения магнитной индукции от $5 \cdot 10^{-12}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ Тл в диапазоне частот 0—0,1 Гц.
- 31.14. ГОСТ 8.144-75. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для измерения магнитной индукции в диапазоне 0,05—2 Тл.
- 31.15. ГОСТ 8.188-76. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерения магнитной индукции в диапазоне 2—10 Тл.
- 31.16. ГОСТ 8.093-80. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерения магнитной индукции от 10^{-13} до 1 Тл в диапазоне частот 0,1—20 000 Гц.

Раздел 32

ВЕНТИЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

СОДЕРЖАНИЕ

32.1. Виды преобразования электрической энергии	617	32.8. Схемы неуправляемых выпрямителей трехфазного тока средней и большой мощности	625
32.2. Типы электрических вентилей	620	32.9. Соотношения для выпрямителей с фазовым управлением	629
32.3. Условные обозначения, применяемые при расчете схем преобразователей	620	Работа выпрямителей на активно-индуктивную нагрузку (629). Работа выпрямителей на противо-ЭДС (630)	
32.4. Выпрямители с идеальными вентилями и трансформаторами	621	32.10. Многофазные составные схемы выпрямления	630
Общие сведения (621). Однофазная однопериодная схема выпрямления (622). Схемы однофазных двухполупериодных выпрямителей (623). Схемы выпрямителей трехфазного тока (623)		32.11. Ведомые сетью (зависимые) инверторы	632
32.5. Пульсации в кривых выпрямленного напряжения и тока. Сглаживающие фильтры	624	32.12. Коэффициент мощности преобразовательных установок	633
32.6. Расчет фильтров	624	32.13. Способы улучшения коэффициента мощности вентильных преобразователей	634
32.7. Выпрямители с умножением напряжения	625	32.14. Выпрямители с нулевым вентилем и несимметричные мостовые схемы	635

32.15. Алгоритмы поочередного управления в ведомых сетью преобразователях . . .	637	32.22. Узлы принудительной коммутации тиристорных преобразователей . . .	651
32.16. Реверсивные преобразователи с двумя вентильными комплектами, обеспечивающими изменение направления потока энергии . . .	639	32.23. Преобразователи постоянного напряжения с дозированной передачей энергии . . .	655
Схемы и режимы работы двухкомплектных реверсивных преобразователей (639). Уравнительный ток (641). Раздельное управление вентильными комплектами (642)		32.24. Автономные инверторы (общая характеристика) . . .	657
32.17. Преобразователи частоты с непосредственной связью . . .	643	32.25. Автономные инверторы тока . . .	658
32.18. Системы управления вентильными преобразователями . . .	645	32.26. Автономные инверторы напряжения . . .	661
32.19. Регулируемые преобразователи переменного напряжения . . .	647	32.27. Выходные фильтры автономных инверторов напряжения . . .	666
32.20. Способы выключения вентилей в преобразовательных установках . . .	648	32.28. Автономные резонансные инверторы . . .	668
32.21. Регулируемые преобразователи постоянного напряжения с непосредственной связью . . .	649	32.29. Зарядные преобразователи емкостных накопителей . . .	671
		32.30. Защита полупроводниковых преобразователей от перенапряжений . . .	672
		32.31. Защита полупроводниковых вентилей от аварийных токов . . .	674
		Средства защиты вентилей по току (674). Датчики защиты (675)	
		32.32. Охлаждение вентилей преобразователей . . .	676
		32.33. Некоторые типы полупроводниковых преобразователей, выпускаемых в СССР . . .	677
		Список литературы . . .	682

32.1. ВИДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электрическая энергия вырабатывается на электрических станциях и передается потребителям главным образом в виде переменного трехфазного тока промышленной частоты 50 Гц. Однако как в промышленности, так и на транспорте имеются установки, для питания которых переменный ток частотой 50 Гц не пригоден.

Вопросами, связанными с преобразованием электрической энергии из одного ее вида в другой, занимается область науки и техники, получившая название преобразовательной техники (или энергетической электроники). К числу основных видов преобразования электрической энергии относятся:

1. *Выпрямление переменного тока* — преобразование переменного тока (обычно промышленной частоты) в постоянный ток. Этот вид преобразования получил наибольшее развитие, так как часть потребителей электрической энергии может работать только на постоянном токе (электрохимические и электрометаллургические установки, электролизные ванны, заряжаемые аккумуляторные батареи, радиотехническая аппаратура и т. д.), другие же потребители имеют на постоянном токе лучшие характеристики, чем на переменном токе (регулируемые электродвигатели).

2. *Инвертирование тока* — преобразование постоянного тока в переменный. Инвертор применяется в тех случаях, когда источник энергии генерирует постоянный ток (электромашинные генераторы постоянного тока, аккумуляторные батареи и другие химические источники тока, фотогенераторы, магнетогидродинамические генераторы и т. д.), а для потребителей нужна энергия переменного тока. В ряде случаев инвертирование тока необходимо при других видах преобразования электрической энергии (преобразование частоты, преобразование числа фаз).

3. *Преобразование частоты* — преобразование переменного тока одной частоты (обычно 50 Гц) в переменный ток другой частоты. Такое преобразование необходимо для питания регулируемых электроприводов переменного тока, установок индукционного нагрева и плавки металлов, ультразвуковых устройств и т. д.

4. *Преобразование числа фаз.* В ряде случаев встречается необходимость в преобразовании трехфазного тока в однофазный (например, для питания дуговых электропечей), или, наоборот, однофазного в трехфазный. Так, на электрифицированном транспорте используется контактная сеть однофазного переменного тока, а на электровозах используются вспомогательные машины трехфазного тока. В промышленности используются трехфазно-однофазные преобразователи частоты с непосредственной связью, в которых наряду с преобразованием промышленной частоты в более низкую происходит и преобразование трехфазного напряжения в однофазное.

5. *Преобразование постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения* (преобразование постоянного напряжения). Подобное преобразование необходимо, например на ряде подвижных объектов, где источником электроэнергии является аккумуляторная батарея или другой источник постоянного тока низкого напряжения, а для питания потребителей требуется более высокое постоянное напряжение (например, источники питания радиотехнической или электронной аппаратуры).

Существуют и некоторые другие виды преобразования электрической энергии (например, формирование определенной кривой переменного напряжения) и, в частности, формирование мощных импульсов тока, которые находят применение в специальных установках, регулируемое преобразование переменного напряжения.

Все преобразователи делятся на две группы: *ведомые* и *автономные*. В первых периодический переход тока с одного вентилля на другой (коммутация тока) осуществляется под действием переменного напряжения какого-либо внешнего источника. Если таким источником является сеть переменного тока, говорят о преобразователе, ведомом сетью. К таким преобразователям относятся: выпрямители, ведомые сетью (зависимые) инверторы, непосредственные преобразователи частоты, преобразователи числа фаз, преобразователи переменного напряжения. Если внешним источником напряжения, обеспечивающим коммутацию, является машина переменного тока (например, синхронный генератор или двигатель), преобразователь называют ведомым машинный.

Т а б л и ц а 32.1. Силовые выпрямительные диоды

Тип	I_{FSM}^* , кА	I_{RRM}^* , мА, не более	U_{RRM}^* , В	U_{FM}^* , В, не более	Масса, кг	Цена, руб.
В10, В25	0,5; 0,9	5	150—1600	1,35	0,045—0,084	2,2—4,8
В50	2,0	5	150—1600	1,35	0,19	3,85—6,0
В200; В320	6,0	8; 20	150—1600	1,35; 1,6	0,5; 1,1	4,6—12,5
В6-200	6,0	8	400—1600	1,35	0,29	20,3—38,8
В500	9,0	30	150—3800	2,0	0,31	18,3—47,7
В800	15,0	20	150—2400	1,85	0,31	18,5—40,0
В2-320	6,5	20	150—4000	1,9	0,15	11,7—29,1
В2-500	7,0	20	1000—3000	1,8	0,47	5,0—8,3
В2-1600	28,0	100	300—1600	1,5	0,4	106—120
Д112-10; Д112-16	0,21; 0,25	1,0; 1,5	100—1400	1,35	0,006	1,4—2,90
Д112-25; Д122-32	0,3; 0,4	4,0; 6,0	100—1400	1,35	0,006; 0,012	2,0—3,7
Д122-40; Д132-50	0,5; 1,0	6,0; 8,0	100—1400	1,35	0,012; 0,027	2,4—4,4
Д132-63; Д132-80	1,1; 1,2	8,0; 10	100—1400	1,35	0,027	2,9—5,3
Д133-400	7,0	50	1000—4000	2,1	0,2	17,4—41,4
Д133-500	9,0	50	1000—2800	1,7	0,2	19,25—36,9
Д143-630	10,0	50	1000—4000	1,6	0,28	22,4—59,5
Д133-800; Д143-1000	12; 18,0	50; 75	400—1600	2,1; 1,55	0,2; 0,28	14,7—41,8
Д143-800	15,0	50	1800—2800	1,7	0,28	34,5—48,2
Д253-1600	28,0	100	400—2000	1,5	0,55	41,8—135
Д141-100; Д151-125	1,9; 2,2	20	300—1600	1,45; 1,35	0,1; 0,18	3,9—8,7
Д151-160; Д161-200	3,0; 5,5	20; 40	300—1600	1,35	0,18; 0,3	4,8—14,5
Д161-250; Д161-320	6,4; 7,5	40; 50	300—1600	1,35	0,3	5,2—17,8
Д171-400	10,5	50	300—1600	1,5	0,51	6,5—21,5
ВЛ10; ВЛ25	0,5; 0,9	4,0; 5,0	600—1200	1,35	0,045; 0,084	2,9—5,10
ВЛ50	2,0	8,0	600—1200	1,35	0,19	5,4—6,7
ДЛ112-10; ДЛ112-16	0,21; 0,25	1,0; 1,5	400—1500	1,35	0,006	1,8—3,2
ДЛ112-25; ДЛ112-32	0,27; 0,4	2,0; 4,0	400—1500	1,35	0,006; 0,012	2,6—4,2
ДЛ122-40; ДЛ132-50	0,5; 1,0	4,0	400—1500	1,35	0,012; 0,027	3,10—4,90
ДЛ132-63; ДЛ132-80	1,1; 1,2	6,0; 8,0	400—1500	1,35	0,027	3,70—6,00
ВЛ200; ВЛ320	6,0; 6,6	12; 20	600—1200	1,35; 1,6	0,5; 1,1	6,30—11,90
ДЛ161-200; ДЛ171-320	5,5; 7,5	25	400—1400	1,45	0,3; 0,51	6,9С—23,30
ДЛ123-320; ДЛ133-500	5,5; 7,5	25	400—1400	1,45	0,07; 0,2	14,00—33,90
ДЧ151-80; ДЧ151-100	2,4; 2,7	25	500—1400	1,85; 1,55	0,18	6,40—10,30
ДЧ161-125; ДЧ161-160	4,5; 5,0	35	500—1400	1,8; 1,45	0,29	7,80—14,70
ДЧ171-250; ДЧ171-320	8,0; 9,0	60	500—1400	2,1; 1,65	0,51	11,60—26,40
ДЧ143-800; ДЧ143-1000	12,0; 14,5	40	600—1800	3,0; 2,3	0,2	26,80—74,30
ВЧ2-160; ВЧ2-200	3,5; 4,3	35	100—1000	1,75; 1,55	0,42	5,60—8,80

* Средний ток I_{FM} , А, в марке прибора; I_{FSM} — ударный неповторяющийся прямой ток; I_{RRM} — повторяющийся импульс обратного тока; U_{RRM} — повторяющийся импульс обратного напряжения; U_{FM} — импульсное падение напряжения в открытом состоянии.

Примечание. ДЛ и ВЛ — лавинные диоды; ДЧ и ВЧ — диоды быстросовооаавляющиеся.

Таблица 32.2. Силовые тиристоры

Тип	I_{TSM} , кА, при T_{max}	I_{RRM} , мА, не более	U_{DRM} , В,	U_{TM} , В, не более	$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{crit}$, В/мкс	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{crit}$, А/мкс	t_q , мкс, не более	Масса, кг	Цена, руб.
T112-10; T112-16	0,15; 0,2	2,5; 3	100—1800	1,85; 1,8	50—1000	100	(4,0)	0,007	В стадии разр.
T122-20; T122-25	0,3; 0,35	3	100—1800	1,75	50—1000	100	(6,0)	0,012	2,7—4,8
T130-40; T130-50	0,75; 0,8	5; 6	100—1200	1,75	50—1000	100	(8,0)	0,013	3,5—6,9
T130-63; T130-80	1,2; 1,35	6	100—1200	1,65	50—1000	100	(10,0)	0,026	3,5—6,9
T132-40; T132-50	0,75; 0,8	5; 6	100—1200	1,75	50—1000	100	(6,0)	0,027	3,8—6,7
T132-16; T132-25	0,22; 0,33	9	1300—2000	2,2	50—1000	100	(6,0)	0,027	7,0—9,1
T142-32	0,38	9	1300—2000	2,1	50—1000	100	(8,0)	0,053	8,5—10,40
T142-40; T142-50	0,7; 0,75	15	1300—2000	2,1	50—1000	100	(8,0)	0,053	9,0—11,10
T142-63; T142-80	1,2; 1,35	3	100—1200	1,65	50—1000	100	—	0,053	4,6—8,4
T152-63; T152-80	1,1; 1,2	20	1300—2000	1,95	50—1000	100	(10)	0,84	10,7—13,85
T25; T50	0,8; 1,5	10; 15	100—1400	1,9; 1,75	20—1000	40—400	30—250	0,12; 0,19	5,2—9,7
T100; T160	3,0; 3,5	20	100—1400	1,95; 1,75	20—1000	40—400	30—250	0,44	6,9—12,2
T123-200; T123-250	3,3; 4,5	15	400—1600	1,9; 1,75	20—1000	100	500	0,07	13,6—26,9
T123-320	5	15	400—1600	1,65	200—1000	100	500	0,07	17,0—25,6
T133-320	6	35	900—2000	2,0	200—1000	100	500	0,2	23,0—37,85
T133-400	7	30	400—1600	1,75	200—1000	100	500	0,2	17,8—37,2
T143-400	8	50	1800—2400	2,15	200—1000	100	500	0,28	47,8—59,5
T143-500; T143-630	10; 12	30	400—1600	1,8; 1,75	200—1000	100	500	0,28	22,8—53,7
T151-100	2,0	15	300—1600	1,85	20—1000	80	250	0,18	6,5—17,9
T161-125; T161-160	2,5; 3,3	15	300—1600	1,75	20—1000	80	250	0,3	6,8—21,3
T171-200; T171-250	5; 6	30	300—1600	1,75	20—1000	80	250	0,51	7,6—26,5
T171-320	7	30	300—1600	1,6	20—1000	80	250	0,51	8,9—30,4
T153-630	14	50	1300—2400	2,1	20—1000	80	250	0,55	89,9—148,2
T153-800	16	50	1000—1800	1,9	20—1000	80	250	0,55	72,2—114,4
T253-800	16	70	2000—2400	2,1	20—1000	80	250	0,55	—
T253-1000	20	70	1000—1800	1,8	20—1000	80	250	0,55	99,8—161,2
T253-1250	26	70	400—1200	1,6	20—1000	80	250	0,55	67,6—158,2
T253-800	15	—	2800; 3200	2,3	1600	50	500	0,55	194—220
T173-1250	20	—	3000	2,5	2500	200	300; 400	1,6	925
T2-160	3,5	20	400—1000	1,6	20—1000	40—200	70—250	0,3	8,3—11,9
T9-250	5,5	15	400—1600	1,85	20—1000	20—200	70—250	0,15	14,7—23,4
T2-320	8,5	200	400—1400	2,1	20—1000	70—400	250	0,31	13,1—29,8
T3-320	6,8	40	1600—2400	2,3	200—1000	20—100	100—250	0,31	54,1—64,1
T500	9,5	20	100—1600	2,1	20—1000	70—400	100—250	0,31	17,9—38,2
T630	13	50	1600—2400	2,3	200—1000	40—200	250	0,345	109—137
T800; T1000	14; 18	50; 70	1000—1800	2,1	200—1000	40—200	250	0,345; 0,375	101—155
T2-800	16	70	1800—2400	2,3	200—1000	40—200	250	0,375	141—177
TБ151-50; ТБ151-63	1,0; 1,1	20	500—1200	2,5; 2,15	200—1000	400	16—32	0,18	8,4—18,7
TБ161-80; ТБ161-100	2,2; 2,5	30	500—1200	2,6; 2,15	200—1000	800	16—32	0,29	11,0—26,5
TБ133-200; ТБ133-250	5,2; 5,5	40	600—1200	2,4; 2,0	200—1000	800	20—40	0,2	32,0—64,0
TБ320	6	35	300—1200	2,8	100—1000	100—200	20—50	0,42	28,6
TБ400	7	35	300—1000	2,1	100—1000	100—200	20—50	0,42	37,7—72,2
TБ143-320; ТБ143-400	6; 7	50	600—1200	2,5; 2,1	200—1000	800	25—50	0,28	45—95
TБ153-630; ТБ153-800	10; 12	70	600—1200	2,2; 1,8	200—1000	800	32—63	0,56	80—187
TБ253-800; ТБ253-1000	20; 21	70	600—1400	2,25; 1,9	200—1000	800	32—63	0,6	—
TБ2-160; ТБ3-200	4; 4,5	25	300—1200	2; 1,7	100—1000	200—400	20—50	0,47	16,40—38,5
TБ171-160; ТБ171-200	4; 2,5	40	500—1200	2; 1,75	200—1000	800	20—50	0,51	20,90—46,50
TЛ2-160	3,5	20	600—900	1,9	50—1000	40—70	70—250	0,42	12,90—14,70
TЛ-200	4	20	600—1100	1,6	50—1000	70	70—250	0,42	14,20—16,90
TЛ-250	4,5	20	400—1100	1,8	20—1000	70	70—250	0,7	14,70—21,50
TЛ171-250; TЛ171-320	6,8; 7,5	35	700—1100	2,05; 1,65	320—1000	100	(6,0)	0,51	18,30—30,30
TЧ-25; ТЧ-40	0,7; 0,9	20	300—900	3,05; 1,95	100—500	100—200	12—30	0,12	8,40—13,00
TЧ-50; ТЧ-63	1,7; 2	30	300—900	2,90; 2,35	100—500	100—200	12—30	0,2	9,80—14,40
TЧ-80	2,4	28	300—900	2,6	100—500	100—200	12—30	0,35	10,90—15,20
TЧ-100; ТЧ-125	2,8; 3,4	28	300—1200	2,0; 1,85	100—500	100—200	12—30	0,35	11,50—17,70
TЧИ-100	2,4	25	500—1200	2,0	100—1000	800	20—30	0,35	13,00—16,80
ТС2-10; ТС2-16	0,08; 0,1	3	100—1100	2,0	20—1000	40—70	—	0,012	2,60—4,50
ТС2-25; ТС2-40	0,12; 0,2	3; 4	100—1100	2,0	20—1000	40—70	—	0,012	3,80—6,50
ТС2-50; ТС2-63	0,23; 0,25	6	100—1100	2,0	20—1000	40—70	—	0,04	5,10—7,20
ТС2-80	0,33	6	100—1100	2,0	20—1000	40—70	—	0,04	5,60—7,90
ТС80; ТС125	1,2; 1,5	20	100—1200	2,3; 1,45	10—1000	5—70	70—250	0,44	8,80—17,40
ТС-160	1,7	20	100—1200	1,45	10—1000	5—70	70—250	0,44	9,0—18,6
ТС161-100; ТС161-125	1,0; 1,5	15	200—1200	1,45	—	—	—	0,298	6,8—22,6
ТС161-160; ТС161-200	1,8; 2,3	15	200—1200	1,75; 1,6	—	—	(15; 20)	0,298	7,9—30,5
ТС171-250; ТС171-320	3,0; 3,3	15	200—1200	1,7; 1,5	—	—	(20; 25)	0,510	9,4—32,0

* Средний ток I_{TAV} , А, в марке прибора;
 I_{TSM} — ударный неповторяющийся прямой ток;
 I_{RRM} — повторяющийся импульс обратного тока;
 U_{TM} — импульсное напряжение в открытом состоянии;
 U_{DRM} — повторяющийся импульс напряжения в закрытом состоянии;
 $\left(\frac{dU}{dt}\right)_{crit}$ — критическая

скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии;
 $\left(\frac{di}{dt}\right)_{crit}$ — критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии;
 t_q — время выключения;
 t_{rr} — время обратного восстановления.

Примечание. ТБ — быстродействующие тиристоры; ТЛ — лавинные тиристоры; ТЧ — высококачественные тиристоры; ТС — симметричные тиристоры (симисторы).

В автономных преобразователях, выполненных на тиристорах, коммутация происходит за счет устройств, органически входящих в состав самого преобразователя (коммутирующие конденсаторы либо специальные коммутационные узлы); в зарубежной литературе такие преобразователи называют самокоммутируемыми (selfcommutated). Если преобразователь выполняется на силовых транзисторах или запираемых (двухоперационных) тиристорах, устройства коммутации не нужны. К автономным преобразователям относятся: автономные инверторы, многие типы преобразователей постоянного напряжения.

32.2. ТИПЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕНТИЛЕЙ

В настоящее время для преобразования электроэнергии применяются почти исключительно надежные и экономичные статические вентиляльные преобразователи, в которых основными элементами являются электрические вентили. *Вентилем* в электротехнике называют прибор, имеющий один или несколько однонаправленных путей для прохождения тока (т. е. путей с однонаправленной проводимостью), которые либо не обладают свойством управляемости, либо могут управляться ключевым способом (т. е. по принципу включено—выключено).

На практике нашли применение вентили следующих типов:

- а) электровакуумные, основанные на прохождении тока через вакуум;
- б) газоразрядные, основанные на прохождении тока через газ или пары металлов;
- в) полупроводниковые, основанные на процессах в твердом теле.

В настоящее время в устройствах преобразовательной техники почти исключительно используются полупроводниковые вентили. Отечественная промышленность серийно выпускает широкую номенклатуру полупроводниковых вентилялей.

1. Диоды, условно разделяемые на маломощные (допустимый средний ток до 1 А), средней мощности (1—10 А) и мощные или силовые (свыше 10 А). В зависимости от назначения диоды делятся на низкочастотные (до 500 Гц), высокочастотные (свыше 500 Гц) и импульсные.

2. Тиристоры незапираемые (однооперационные) и непроводящие в обратном направлении.

3. Тиристоры запираемые (двухоперационные).

4. Тиристоры, проводящие в обратном направлении, т. е. тиристоры без обратной блокирующей способности (тиристоры-диоды).

5. Фототиристоры, т. е. тиристоры, управляемые светом постороннего источника.

6. Оптронные тиристоры (диодно-тиристорные оптронные пары), управляемые светом от помещенного в том же корпусе, но электрически изолированного светоизлучающего диода.

7. Симметричные (двунаправленные) тиристоры (триаки, симисторы).

8. Силовые транзисторы, которые в преобразовательной технике применяются только в

ключевом режиме и при таком использовании также могут быть отнесены к вентилям.

Кроме того, в преобразовательной технике находят применение силовые кремниевые стабилитроны и кремниевые симметричные ограничители напряжения (КСОН), применяемые для защиты вентилялей и других устройств от коммутационных перенапряжений.

Основные справочные данные выпускаемых промышленностью мощных силовых полупроводниковых вентилялей разных типов приведены в табл. 32.1 и 32.2.

32.3. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАСЧЕТЕ СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В тексте настоящего раздела использованы следующие условные обозначения, распространенные в технической литературе:

- C_{Φ} — емкость сглаживающего фильтра;
- $E_{д\beta}$ — ЭДС источника в цепи постоянного тока инвертора;
- E_0 — против-ЭДС в цепи выпрямленного тока;
- $e_{1,2}$ — мгновенные значения ЭДС сетевой и вентильной обмоток трансформатора соответственно;
- I — действующее значение прямого тока вентиля;
- I_a — среднее значение прямого тока вентиля;
- I_d — среднее значение выпрямленного тока;
- $I_{d\alpha}$ — среднее значение выпрямленного тока управляемого выпрямителя;
- I_n — действующее значение n -й гармоники тока;
- $I_{1,2}$ — действующие значения тока первичной и вторичной обмоток трансформатора;
- i_a — мгновенное значение прямого тока вентиля;
- i_d — мгновенное значение выпрямленного тока;
- $i_{d\alpha}$ — мгновенное значение выпрямленного тока управляемого выпрямителя;
- $i_{d\beta}$ — мгновенное значение инвертируемого тока;
- $i_{1,2}$ — мгновенные значения тока сетевой и вентильной обмоток трансформатора;
- k_i — коэффициент искажения формы кривой тока;
- L_d — индуктивность, включенная в цепи постоянного тока;
- L_{Φ} — индуктивность фильтра;
- m — число фаз преобразования;
- $n_{тр}$ — коэффициент трансформации;
- P — активная мощность;
- Q — реактивная мощность;
- q — коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения;
- R_d — сопротивление нагрузки выпрямителя;
- r_d — сопротивление, включенное в анодную цепь вентиля;
- $r_{тр}$ — активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вентильной стороне;
- r_1 — дифференциальное прямое сопротивление вентиля;

- S — полная мощность;
 $S_{1,2\text{тр}}$ — первичная, вторичная и полная расчетные мощности трансформатора;
 s — коэффициент сглаживания фильтра;
 T — мощность искажения (мощность высших гармоник);
 t_q — время восстановления запирающих свойств тиристора;
 $t_{\text{сх}}$ — схемное время восстановления запирающих свойств;
 U_d — среднее значение выпрямленного напряжения;
 $U_{d\alpha}$ — среднее значение выпрямленного напряжения управляемого выпрямителя;
 $U_{d\alpha\gamma}$ — среднее значение выпрямленного напряжения управляемого выпрямителя с учетом коммутационных потерь напряжения;
 U_{d*} — относительное значение выпрямленного напряжения;
 U_{d0} — среднее значение выпрямленного напряжения при угле коммутации $\gamma=0$ и $\alpha=0$;
 $U_{d\beta}$ — среднее значение внутренней противо-ЭДС инвертора;
 $U_{1,2}$ — действующие значения напряжений обмоток трансформатора;
 u_d — мгновенное значение выпрямленного напряжения;
 $u_{d\beta}$ — мгновенное значение внутренней противо-ЭДС инвертора;
 $u_{i,2}$ — мгновенные значения напряжений обмоток трансформатора;
 X_a — суммарное индуктивное сопротивление фазы трансформатора и сети, приведенные к вентильной стороне трансформатора;
 α — угол управления (угол задержки включения вентилей выпрямителя);
 β — угол опережения включения вентилей инвертора;
 γ — угол перекрытия (угол коммутации);
 δ — угол выключения (угол, предоставляемый для восстановления запирающих свойств вентилем инвертора);
 $\Delta U_{d\gamma}$ — среднее значение снижения напряжения на нагрузке за счет коммутационных потерь напряжения;
 η — КПД преобразователя;
 λ_a — длительность открытого состояния вентилей;
 ν — порядок высшей гармонической составляющей;
 φ — угол фазового сдвига между током и напряжением;
 χ — коэффициент мощности преобразователя.

32.4. ВЫПРЯМИТЕЛИ С ИДЕАЛЬНЫМИ ВЕНТИЛЯМИ И ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Общие сведения

Основными блоками выпрямителя (рис. 32.1) являются: Tr — трансформатор; B — группа вентилей; Φ — фильтр, служащий для

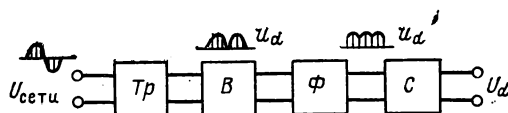


Рис. 32.1. Структурная схема выпрямителя

сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения; C — блок стабилизации среднего значения выпрямленного напряжения (в случае необходимости). Трансформатор Tr служит для согласования выходного напряжения выпрямителя с напряжением сети, а в некоторых случаях — для получения нейтральной точки у фазных обмоток и в этих случаях является неотъемлемой частью выпрямителя. Расчетные формулы для основных схем выпрямления, отличающихся способом включения вентилей и трансформатора при идеальных вентилях и идеальном трансформаторе ($R_{\text{тр}}=0$; $X_a=0$) и при чисто активной нагрузке ($X_d=0$, $L_d=0$), приведены в табл. 32.3.

Основные показатели работы выпрямителя:

1. *Внешняя характеристика* — зависимость выпрямленного (выходного) напряжения от тока нагрузки. Наклон внешней характеристики для реальных выпрямителей определяется внутренними сопротивлениями вентилей и обмоток трансформатора, а также зависит от характера нагрузки (индуктивная, емкостная, противо-ЭДС) и длительности процесса перехода тока с одного вентилей на другой (коммутация тока).

2. *Коэффициент использования преобразовательного трансформатора* $S_{\text{тр}}=S_{\text{тр}}/P_d$ — отношение расчетной мощности трансформатора, определяющей его габариты, к мощности постоянной составляющей на выходе выпрямителя.

3. *Коэффициент мощности* $\chi=P/S$ — отношение активной мощности, потребляемой от сети переменного тока, к полной кажущейся мощности.

4. *Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения* $q=U_n/U_d$ — отношение амплитуды n -й гармоники (обычно наиболее низкочастотной) в кривой выпрямленного напряжения к среднему значению выпрямленного напряжения.

Расчет выпрямителя в большинстве случаев проводится из условий обеспечения заданных напряжений U_d и тока I_d . Задаются напряжение и частота питающей сети U_1 и f . Расчет сводится к определению токов и напряжений, необходимых для выбора типа и числа вентилей, а также для электрического расчета трансформатора (числа витков обмоток и размеров магнитопровода).

Выбор типа фильтра и стабилизатора определяется характером нагрузки, диапазоном изменения тока нагрузки, а также типом вентилей. Для малоомощных выпрямителей с вентилями и трансформатором, имеющими относительно большое внутреннее сопротивление, обычно применяются фильтры с емкостным входом; мощные выпрямители работают с индуктивными или резонансными фильтрами. При расчете выпрямителей, имеющих на выходе фильтр, необходимо учитывать влияние последнего на процессы в выпрямителе (форма тока и длительность его протекания в цепях вентилей).

Таблица 32.3. Схемы выпрямления и расчетные формулы при чисто активной нагрузке, идеальных вентильях и трансформаторах

Схема						
m	1	2	2	3	6	3
U_d/U_2	0,45	0,9	0,9	1,17	2,34	1,17
$U_{d\text{пр max}}/U_d$	3,14	3,14	1,57	2,09	1,045	2,09
Форма кривой I_d						
I_d/I_d	1	0,5	0,5	0,33	0,33	0,33
$I_{d\text{ max}}/I_d$	3,14	1,57	1,57	1,21	1,045	1,21
Форма кривой i_2						
I_2/I_d	1,57	0,785	1,11	0,577	0,815	0,577
Форма кривой i_1						
$I_1\omega_1/I_d\omega_2$	1,21	1,11	1,11	0,471	0,816	0,471
S_1/P_d	2,69	1,23	1,23	1,21	1,045	1,21
S_2/P_d	3,49	1,74	1,23	1,48	1,045	1,71
S_T/P_d	3,09	1,48	1,23	1,345	1,045	1,46
U_{nm}/U_d $k=1$	1,57	0,663	0,663	0,250	0,057	0,250
$n=k\pi$ $k=2$	0,633	0,133	0,133	0,057	0,014	0,057
$k=3$	0,55	0,057	0,057	0,025	0,006	0,025

лей и обмоток трансформатора, пульсации выходного напряжения и др. — см. § 32.6).

Все выпрямители (кроме однофазных двухполупериодных при чисто активной нагрузке) потребляют из сети несинусоидальный ток. В кривой тока, потребляемого m -фазным выпрямителем, имеются высшие гармоники с частотами $f_2 = (km \pm 1)f_c$, где f_c — частота сети; $k=1, 2, 3, \dots$

Например, $f_2/f_c = 2, 4, 5, 7, \dots$ при $m=3$ и $f_2/f_c = 5, 7, 11, 13, \dots$ при $m=6$.

Однофазная однополупериодная схема выпрямления

Ток в вентиле, нагрузке и вторичной обмотке трансформатора ($i_a = i_d = i_2$) однонаправленный (рис. 32.2, а). В первичной цепи

ток переменный, его рабочая составляющая (без учета намагничивающего тока трансформатора) $i_1 = (i_2 - I_d)/n_{TP}$:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1^2 d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (i_2 - I_d)^2 d\theta / n_{TP}} = 1,21 I_d / n_{TP}$$

Магнитная система трансформатора подмагничивается постоянной составляющей вторичного тока. Соотношения, приведенные в табл. 32.3, показывают, что расчетная мощность трансформатора в этой схеме велика. Схема применяется для маломощных выпрямителей с

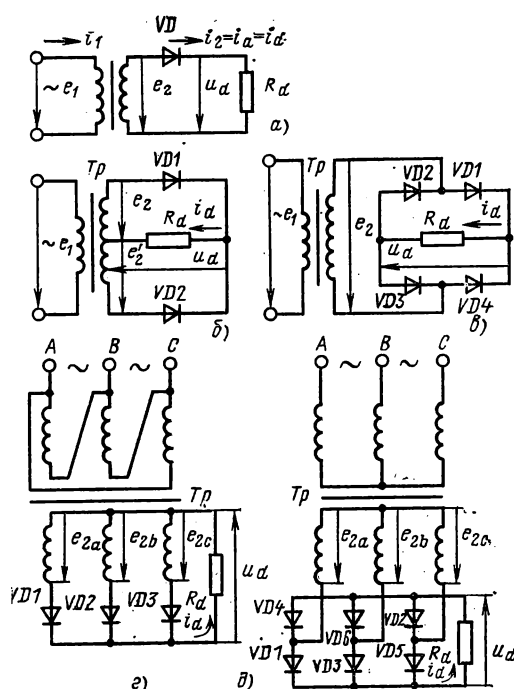


Рис. 32.2. Схемы выпрямителей:

а — однофазная однополупериодная; б — однофазная нулевая; в — однофазная мостовая; г — трехфазная нулевая; д — трехфазная мостовая

емкостными фильтрами. Расчетные соотношения при наличии в цепи индуктивности — см. [32.1].

Схемы однофазных двухполупериодных выпрямителей

В двухполупериодных схемах (рис. 32.2, б, в) через нагрузку ток протекает в течение обоих полупериодов переменного напряжения. В схеме (рис. 32.2, б) выведена средняя точка вторичной обмотки трансформатора, а вентили анодами (или катодами) присоединяются к концам обмотки (нулевая схема). В схеме другого типа (рис. 32.2, в) вентили собираются в мост (мостовая схема). В двухполупериодных схемах отсутствует поток подмагничивания магнитопровода трансформатора.

Мостовая схема, как показывает табл. 32.3, имеет то преимущество, что трансформатор используется лучше, т. е. его габариты меньше при той же выходной мощности выпрямителя. Меньше и относительное обратное напряжение на вентиле. Однако в мостовой схеме число вентиля в 2 раза больше, чем в нулевой.

Схемы выпрямителей трехфазного тока

Здесь также применяются два типа схем — схемы с выводом нулевой точки (рис. 32.2, г) вентильных обмоток трансформатора (нулевые

схемы) и мостовые схемы (рис. 32.2, д). В нулевой схеме, когда вентили соединены вместе катодами, а анодами присоединены к обмоткам трансформатора, в любой момент времени проводит ток тот вентиль, потенциал анода которого наиболее положителен по отношению к нулевой точке вентильных обмоток. В мостовой схеме во внекоммутационный период ток проводят одновременно два вентиля: один из катодной группы, другой — из анодной. При этом из катодной группы (VD1, VD3, VD5) проводит тот вентиль, потенциал анода которого наиболее положителен, а из анодной группы (VD2, VD4, VD6) тот, потенциал катода которого наиболее отрицателен. В нулевой схеме кривая напряжения на нагрузке формируется из отрезков синусоид фазных напряжений. В мостовой схеме (которую можно рассматривать как две последовательно включенные нулевые схемы, питающиеся от одних и тех же вентильных обмоток трансформатора) напряжение на нагрузке формируется из отрезков синусоид линейных напряжений. При этом среднее значение напряжения на нагрузке U_d оказывается в 2 раза выше, чем в нулевой схеме (см. табл. 32.3). Амплитуда обратного напряжения, приложенного к вентилю, оказывается в обеих схемах равной амплитуде линейного напряжения. Однако обратное напряжение, приложенное к вентилю, оказывается в 2 раза меньше в мостовой схеме, чем в нулевой, при одном и том же среднем значении напряжения на нагрузке.

Нулевая схема с точки зрения частоты и пульсации выпрямленного напряжения обеспечивает режим трехфазного выпрямителя ($m=3$), а мостовая — шестифазного выпрямителя ($m=m_{\text{эв}}=6$).

Хотя нулевая схема имеет в 2 раза меньшее число вентиля, чем мостовая, она обладает рядом недостатков по сравнению с мостовой:

- 1) наличие в магнитопроводе трансформатора постоянного потока вынужденного подмагничивания, в результате чего резко увеличивается намагничивающий ток. Если вторичную обмотку трансформатора выполнить в виде зигзага (см. последний столбец в табл. 32.3), в котором ток каждого вентиля всегда протекает по двум обмоткам, расположенным на двух разных стержнях трансформатора, то постоянные составляющие МДС обмоток на каждом из стержней компенсируются, однако в этом случае расчетная мощность трансформатора увеличивается и сам трансформатор усложняется;

- 2) отношение максимального значения обратного напряжения на вентиле к среднему значению выпрямленного напряжения в 2 раза больше;

- 3) отношение расчетной мощности трансформатора к мощности в нагрузке больше (как видно из табл. 32.3) примерно на 30 %;

- 4) коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения выше (более чем в 4 раза), что требует использования более громоздких фильтров.

Поэтому трехфазная нулевая схема используется лишь в простых выпрямителях средней мощности (до 30—50 кВт) при невысоком напряжении.

32.5. ПУЛЬСАЦИИ В КРИВЫХ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Кривая напряжения на выходе выпрямителя u_d (рис. 32.3) имеет пульсации. Порядок гармонических составляющих n кратен числу фаз выпрямления $m: n = k_r m$, где $k_r = 1, 2, 3, \dots$ — кратность гармоник.

Амплитуды составляющих U_n определяются разложением кривой u_d в ряд Фурье. При идеальных вентилях и трансформаторе и непрерывной кривой выпрямленного тока (на входе фильтра индуктивность) $U_n = 2 U_d / (n^2 - 1)$ (эта формула не относится к случаю, когда $m = 1$).

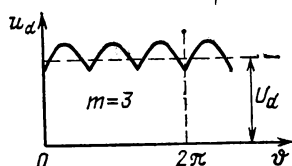


Рис. 32.3. Пульсации в кривой выпрямленного напряжения

Следовательно, коэффициент пульсаций для гармоники порядка n

$$q = \frac{U_n}{U_d} = \frac{2}{n^2 - 1}.$$

При фазовом регулировании выпрямленного напряжения, когда включение каждого вентиля задерживается на угол α , коэффициент пульсаций

$$q = \frac{2}{n^2 - 1} \sqrt{1 + n^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}.$$

Для сглаживания пульсаций кривой выпрямленного напряжения и тока применяются фильтры. Расчет сглаживающих фильтров производят с учетом гармонических порядка $n = m$, т. е. при $k_r = 1$. Как показано на эквивалентной схеме Г-образного фильтра (рис. 32.4), в кривой напряжения u_d можно выделить постоянную составляющую, которая не должна

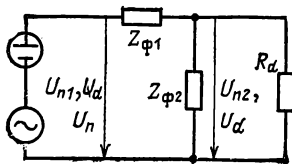


Рис. 32.4. Структурная схема сглаживающего фильтра

изменяться фильтрами, и переменную составляющую, которая должна замыкаться в контуре $Z_{\phi 1}$ и $Z_{\phi 2}$. На сопротивлении $Z_{\phi 1}$ имеет место падение напряжения от переменной составляющей тока. Для переменной составляющей тока сопротивление параллельной ветви фильтра $Z_{\phi 2}$ должно быть много меньше сопротивления цепи нагрузки, а сопротивление звена $Z_{\phi 1}$ должно быть много больше сопротивления нагрузки.

Заданными величинами при расчете фильтра являются коэффициенты пульсаций на входе

$q_{вх}$ и на выходе $q_{вых}$ ($q_{вых}$ задается потребителем).

Коэффициент сглаживания фильтра

$$s = \frac{q_{вх}}{q_{вых}} = \frac{U_{nвх} U_{dвых}}{U_{dвх} U_{nвых}}.$$

При $U_{dвых} \approx U_{dвх}$

$$s = \frac{U_{nвх}}{U_{nвых}} = \left| \frac{Z_{\phi 1} + Z_{\phi 2}}{Z_{\phi 2}} \right|.$$

32.6. РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ

Простой индуктивный фильтр (рис. 32.5, а) используется главным образом в мощных выпрямителях, так как при небольших R_d он дей-

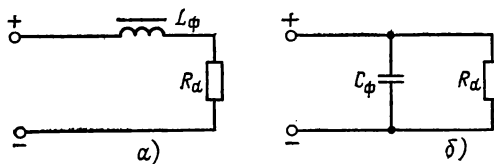


Рис. 32.5. Схемы простых сглаживающих фильтров: а — индуктивный фильтр; б — емкостный фильтр

ствует наиболее эффективно. Такой фильтр, как и Г-образный фильтр с индуктивным входом при $m \geq 2$, сглаживает выходной ток выпрямителя, в связи с чем токи вентилях в обмотках трансформатора приобретают прямоугольную форму (что, в частности, сказывается на расчетных показателях выпрямителя (см. [32.2])).

Амплитудное значение тока n -й гармоники, протекающего через L_{ϕ} и R_d ,

$$I_n = \frac{U_n}{\sqrt{R_d^2 + (n\omega L_{\phi})^2}}.$$

Следовательно, коэффициент сглаживания

$$s = \frac{\sqrt{(n\omega L_{\phi})^2 + R_d^2}}{R_d} \approx \frac{n\omega L_{\phi}}{R_d},$$

откуда требуемая индуктивность сглаживающего реактора $L_{\phi} = s R_d / n\omega$.

В магнитопроводе реактора необходимо предусмотреть воздушный зазор для устранения возможного насыщения за счет протекания через обмотку постоянной составляющей тока нагрузки.

Простой емкостный фильтр (рис. 32.5, б) используется главным образом при относительно высокоомной нагрузке. Этот фильтр применяется чаще всего на выходе однополупериодной или двухполупериодной схемы выпрямления. Такой фильтр сильно изменяет режим работы выпрямителя, так как вентили включают лишь на весьма короткое время, когда напряжение вторичной обмотки трансформатора относительно мало превышает пульсирующее напряжение на конденсаторе (подробнее — см. [32.1]).

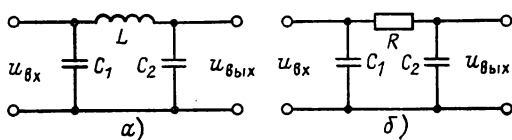


Рис. 32.6. Схемы сложных сглаживающих фильтров

Требуемая емкость фильтра C при заданном коэффициенте пульсаций q :
для однополупериодной схемы выпрямления

$$C_{\Phi} \geq \frac{2}{q\omega R_d};$$

для двухполупериодной схемы выпрямления

$$C_{\Phi} \geq \frac{1}{2q\omega R_d}.$$

Коэффициент пульсации q выбирается обычно в диапазоне 0,01—0,1.

Для получения лучшего сглаживания выходного напряжения после емкостного фильтра подсоединяют еще Г-образное звено LC или RC (рис. 32.6, а или б). Получающийся П-образный фильтр состоит из двух звеньев: звена C_1 и Г-образного звена $L_{\Phi}C_2$ или $R_{\Phi}C_2$. Для фильтра $L_{\Phi}C_2$, приняв $U_{d1}=U_{d2}$, можно записать

$$s_{LC} = \left| \frac{j\omega L_{\Phi} + 1/j\omega C_2}{1/j\omega C_2} \right| = n^2 \omega^2 L_{\Phi} C_2 - 1.$$

32.7. ВЫПРЯМИТЕЛИ С УМНОЖЕНИЕМ НАПЯЖЕНИЯ

Если необходимо получить повышенное выпрямленное напряжение при заданном U_2 и, в частности, построить выпрямитель с выходным напряжением порядка десятков или сотен киловольт, но при относительно небольшом токе, применяют схемы выпрямления с умножением напряжения.

Две разновидности цепочечных схем умножения показаны на рис. 32.7.

Схема выпрямителя рис. 32.7, а называется схемой умножения напряжения первого рода. В этой схеме на любом конденсаторе при холостом ходе получается сглаженное напряжение, равное амплитуде напряжения питания, умноженной на номер конденсатора.

В цепочных схемах выпрямления с умножением напряжения второго рода (рис. 32.7, б) каждый конденсатор, кроме C_1 , заряжается до удвоенного амплитудного значения напряжения питания $2\sqrt{2}E_2$. На конденсаторе C_1 действует сглаженное напряжение, равное амплитудному значению напряжения $\sqrt{2}E_2$. Подключая нагрузку к нескольким последовательно включенным конденсаторам, получаем на ней постоянное напряжение, равное $2n\sqrt{2}E_2$.

Поскольку с ростом тока нагрузки растут пульсации напряжения на конденсаторах, а среднее значение напряжения на них снижается, схемы выпрямления с умножением напряжения целесообразно использовать при небольших токах нагрузки, причем чем больше число

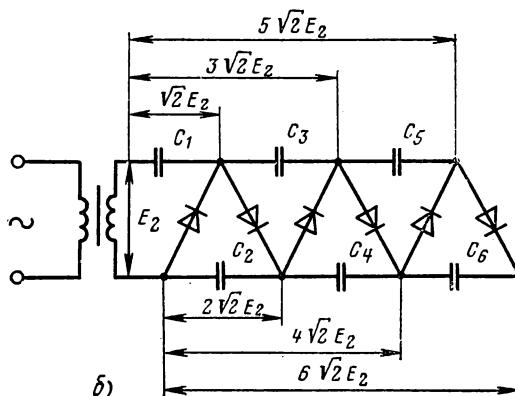
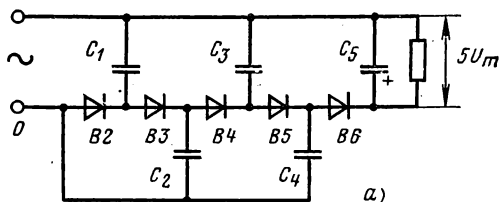


Рис. 32.7. Схемы выпрямления с умножением напряжения

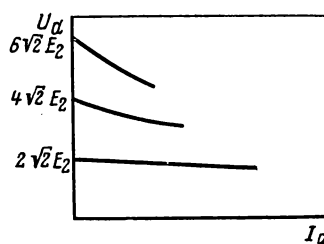


Рис. 32.8. Внешние характеристики выпрямителей с умножением напряжения

n , тем меньше должен быть ток нагрузки. К недостаткам этих схем следует отнести круто падающую нагрузочную характеристику (рис. 32.8).

32.8. СХЕМЫ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА СРЕДНЕЙ И БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

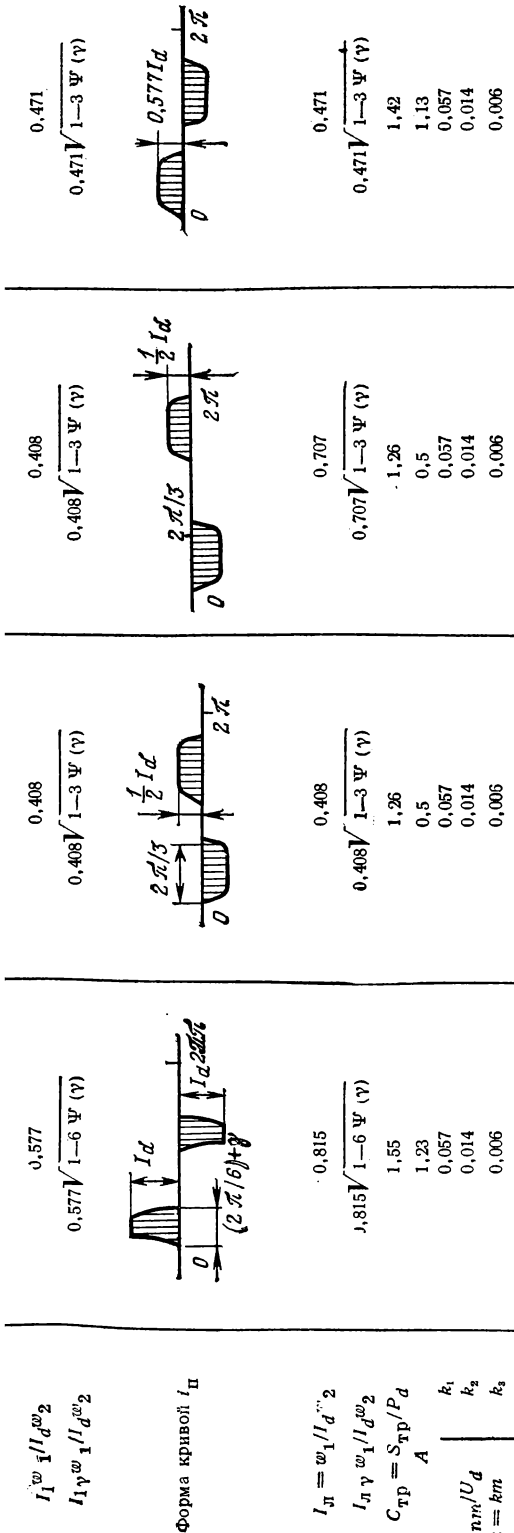
При увеличении мощности выпрямительных установок (свыше нескольких киловатт) используются схемы, питающиеся от трехфазной сети переменного тока и обеспечивающие режим трехфазного ($m=3$) или шестифазного ($m=6$) выпрямления.

Увеличение числа фаз выпрямления при переходе к трехфазной сети переменного тока обеспечивает:

- 1) равномерную загрузку током фаз питающей сети;
- 2) уменьшение относительной нагрузки вентилей выпрямителя по току (относительно тока нагрузки);

Таблица 32.4. Схемы выпрямления и расчетные формулы при $X_d = \infty$ в идеальных вентильх и реальных трансформаторах

Схема и векторная диаграмма				
$\frac{U_{d0}^m}{U_2}$ $U_{обр\ max}/U_{d0}$	$\frac{6}{1,35}$ $\frac{6}{2,35}$	$\frac{6}{1,17}$ $\frac{6}{2,09}$	$\frac{6}{1,17}$ $\frac{6}{2,09}$	$\frac{6}{1,35}$ $\frac{6}{1,645}$
Форма кривой i_a				
I_a/I_d	0,167	0,167	0,167	0,167
Форма кривой i_2				
I_2/I_d $I_{2\gamma}/I_d$	0,458 $\frac{0,408}{1-\Psi(\gamma)}$	0,289 $\frac{0,408}{1-\Psi(\gamma)}$	0,289 $\frac{0,408}{1-\Psi(\gamma)}$	0,577 $\frac{0,587}{1-\Psi(\gamma)}$
Форма кривой i_1				



3) лучшую форму кривой тока, потребляемого от сети;

4) снижение пульсаций выпрямленного тока и напряжения и увеличение их частоты.

Выпрямители средней и большой мощности обычно имеют в цепи нагрузки достаточное индуктивное сопротивление $X_d = 2\pi f L_d$, поэтому расчетные соотношения для них обычно приводятся для случая $X_d/R_d = \infty$ (табл. 32.4).

В любой схеме выпрямления (кроме выпрямителей с емкостным фильтром и схем с умножением напряжения) кривая выпрямленного напряжения формируется из отрезков синусоидального напряжения e_2 вентильных обмоток выпрямительного трансформатора. Какая часть кривой e_2 входит в состав выпрямленного напряжения u_d , зависит от числа фаз выпрямления m . Поэтому среднее значение напряжения на выходе m -фазного выпрямителя U_{d0} при холостом ходе ($I_d \approx 0$) и при отсутствии регулирования ($\alpha = 0$) (рис. 32.9, а) зависит от m :

$$U_{d0} = \frac{1}{2\pi/m} \int_{-\pi/m}^{\pi/m} \sqrt{2} E_2 \cos \vartheta d\vartheta = \sqrt{2} E_2 \frac{\sin \pi/m}{\pi/m},$$

где E_2 — действующее значение фазного напряжения.

В трехфазной мостовой схеме (рис. 32.9) на нагрузке действует напряжение, состоящее из отрезков кривых линейных напряжений. Поэтому в выражение для U_{d0} вместо E_2 надо подставлять $\sqrt{3} E_2$ и брать $m=6$, тогда $U_{d0} = 2,34 E_2$.

В схеме звезда — шестифазная звезда с нулевым выводом (шестифазная «нулевая» схема, первый столбец в табл. 32.4) нескомпенсированный поток вынужденного подмагничивания в трансформаторе 6 раз за период меняет направление, это вызывает ряд отрицательных последствий, из-за которых схема практически не применяется. Для исключения потока вынужденного подмагничивания

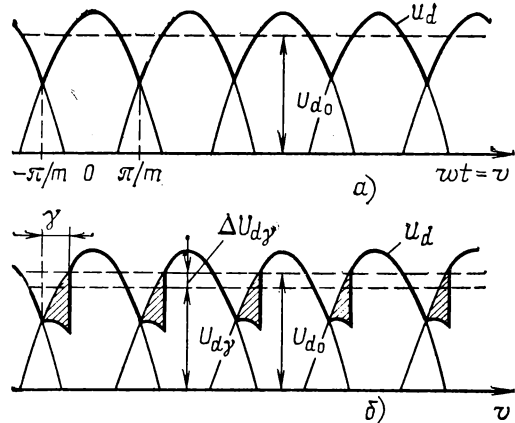


Рис. 32.9. Временные диаграммы выпрямленного напряжения неуправляемого выпрямителя ($\alpha=0$) при мгновенной коммутации $\gamma=0$ (а) и при $\gamma \neq 0$ (б)

в шестифазной «нулевой» схеме используется:

1) соединение первичной обмотки в треугольник;

2) либо распределение вторичного тока одновременно по двум обмоткам, расположенным на различных стержнях трансформатора, путем соединения вторичных обмоток в «шестифазный зигзаг». Однако в обоих случаях коэффициент расчетной мощности трансформатора велик, что говорит о плохом использовании последнего. На режим работы выпрямителей средней и большой мощности оказывают существенное влияние «анодные» индуктивные сопротивления $X_a = 2\pi f L_a$, которые в эквивалентной схеме выпрямителя оказываются включенными последовательно с вентильными обмотками трансформатора. Эти сопротивления определяются главным образом индуктивностями рассеяния обмоток трансформатора и индуктивностью питающей сети переменного тока. Наличие анодных индуктивностей приводит к затяжке процессов переключения (коммутации) тока с вентилей одной фазы на вентили другой фазы. В течение интервала коммутации γ ток одновременно проводят вентили двух фаз, участвующих в коммутации. Следовательно, длительность протекания тока λ_a через вентиль возрастает:

$$\lambda_a = 2\pi/m + \gamma.$$

На интервале коммутации напряжение u_d на выходе выпрямителя определяется как полусумма напряжений фаз, участвующих в коммутации:

$$u_d = \frac{e_{2a} + e_{2b}}{2}.$$

Вследствие этого в кривой выпрямленного напряжения u_d появляются «вырезки» (рис. 32.9, б) и среднее значение напряжения на нагрузке $U_{d\gamma}$ оказывается меньше, чем при холостом ходе U_{d0} .

Снижение выпрямленного напряжения $\Delta U_{d\gamma}$ из-за коммутационных потерь тем больше, чем больше m , X_a и I_d :

$$\Delta U_{d\gamma} = \frac{1}{2\pi/m} \int_0^{\lambda_a} X_a di = \frac{m X_a}{2\pi} I_d.$$

Это объясняется тем, что с ростом как X_a , так и I_d длительность процесса коммутации γ увеличивается

$$\gamma = \arccos \left[1 - \frac{I_d X_a}{\sqrt{2} E_2 \sin \pi/m} \right]$$

и площадь «вырезок» в кривой U_d возрастает.

Зависимость среднего значения выпрямленного напряжения U_d от тока I_d нагрузки называется внешней (нагрузочной) характеристикой выпрямителя (рис. 32.10, линия 1)

$$U_{d\gamma} = U_{d0} - \Delta U_{d\gamma} = U_{d0} - \frac{m X_a}{2\pi} I_d.$$

Если в последнюю формулу ввести относительное напряжение короткого замыкания

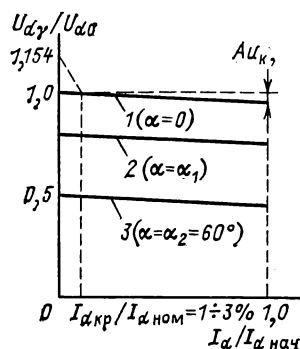


Рис. 32.10. Внешние характеристики выпрямителей (в относительных единицах):

1 — при $\alpha=0$ (неуправляемый выпрямитель); 2 и 3 — при $\alpha \neq 0$

трансформатора $u_{\kappa\%}$, то при номинальном токе $I_d = I_{dном}$ относительное снижение напряжения

$$\Delta U_{d\gamma\%} = \frac{\Delta U_{d\gamma}}{U_{d0}} = A u_{\kappa\%},$$

где A — коэффициент, зависящий от схемы выпрямления (см. табл. 32.4).

Внешняя характеристика выпрямителя строится обычно в относительных единицах

$$U_{d\gamma^*} = 1 - \frac{A u_{\kappa\%}}{100} I_{d^*},$$

где $U_{d\gamma^*} = U_{d\gamma}/U_{d0}$; $I_{d^*} = I_d/I_{dном}$.

Схема с уравнильным реактором (2-й или 3-й столбец табл. 32.4) при малых токах ($I_d < I_{dкр}$) работает как шестифазная нулевая схема с резко падающей внешней характеристикой (пунктир на рис. 32.10) и напряжением холостого хода $U_{d0} = 1,35 E_2$. Когда обе трехфазные нулевые группы начинают работать параллельно (это имеет место при $I_d \gg I_{dкр}$), то наклон характеристики уменьшается, причем условное напряжение холостого хода $U_{d0}' = 1,17 E_2$.

Ток через вентиль (среднее значение) в m -фазной нулевой схеме при большой индуктивности цепи нагрузки имеет форму прямоугольника (при $\gamma=0$) длительностью $\lambda_a = 2\pi/m$, поэтому

$$I_a = I_a/m;$$

здесь для трехфазной мостовой схемы надо брать $m=3$.

Действующее значение тока в фазе вентильной обмотки преобразовательного трансформатора с учетом коммутации

$$I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{m}} \sqrt{1 - m\psi(\gamma)},$$

где $\sqrt{1 - m\psi(\gamma)}$ — функция, учитывающая процесс коммутации (рис. 32.11).

Действующее значение первичного тока с учетом коммутации

$$I_1 = I_{1(\gamma=0)} \sqrt{1 - 2m \sin^2 \frac{\pi}{m} \psi(\gamma)}.$$

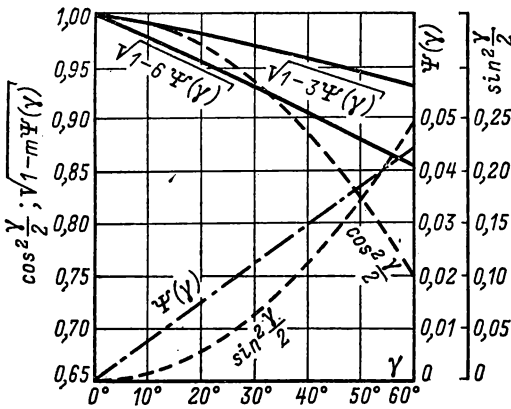


Рис. 32.11. Зависимость коммутационной функции от угла управления α

Расчетные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора в общем случае

$$S_1 = m_1 I_1 U_1; \quad S_2 = m_2 I_2 U_2.$$

Типовая (расчетная) мощность трансформатора

$$S_{\text{тр}} = \frac{S_1 + S_2}{2} = C_{\text{тр}} P_d.$$

Значения коэффициента $C_{\text{тр}}$ для различных схем и $\gamma=0$ приведены в табл. 32.3 и 32.4.

32.9. СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Работа выпрямителей на активно-индуктивную нагрузку

Линейные диаграммы напряжения при фазовом регулировании напряжения трехфазного нулевого выпрямителя, осуществляемом путем введения угла управления α , показаны на рис. 32.12 для случая, когда нагрузка имеет индуктивный характер. При непрерывном выпрям-

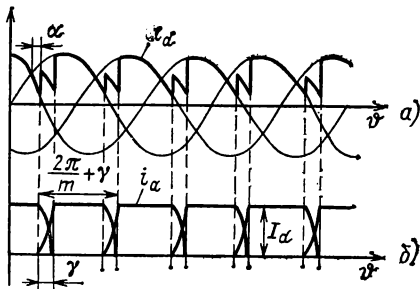


Рис. 32.12. Временные диаграммы напряжения на нагрузке (а) и токов вентилей (б) с учетом процесса коммутации

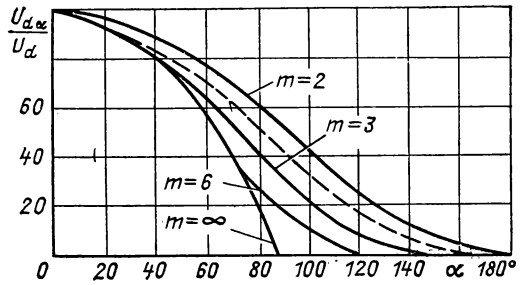


Рис. 32.13. Регулировочные характеристики управляемых выпрямителей при различных m

ленном токе и при $\gamma=0$ среднее значение напряжения

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{2\pi/m} \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{+\frac{\pi}{m} + \alpha} \sqrt{2} E_2 \cos \theta d\theta = U_{d0} \cos \alpha.$$

Зависимость $U_{d\alpha} = f(\alpha)$ (регулировочная характеристика) для любого m при достаточно большой индуктивности в цепи нагрузки ($X_d/R_d \gg 1$, построенная по этому соотношению, показана на рис. 32.13 (кривая, обозначенная $m=\infty$).

При $X_d=0$ (чисто активная нагрузка) в кривой выпрямленного тока при $\alpha > \alpha_{\text{кр}} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$ появляются разрывы. Так как при $X_d \neq 0$ в кривой выпрямленного напряжения при $\alpha > \alpha_{\text{кр}}$ имеются отрицательные площади, а при $X_d=0$ их нет, регулировочные характеристики в последнем случае на участке $\alpha > \alpha_{\text{кр}}$ идут выше (рис. 32.13). При $m \rightarrow \infty$ $\alpha_{\text{кр}} \rightarrow \pi/2$ и регулировочная характеристика для случая чисто активной нагрузки такого выпрямителя совпадает с характеристикой для конечного числа $m > 2$ и $X_d/R_d = \infty$.

При чисто активной нагрузке в режиме разрывных токов I_d (т. е. при $\alpha > \alpha_{\text{кр}}$) регулировочная характеристика определяется выражением

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \frac{1 - \sin(\alpha - \pi/m)}{2 \sin \pi/m}$$

и диапазон изменения угла α , необходимый для изменения выпрямленного напряжения U_d во всем диапазоне от 0 до U_{d0} , зависит от числа фаз выпрямления m $0 \leq \alpha \leq \pi/2 + \pi/m$.

При конечном значении X_d/R_d ($0 < X_d/R_d < \infty$) режим разрывного тока (рис. 32.14, а) наступает при $\alpha_{\text{кр}1} > \alpha_{\text{кр}}$ и регулировочная характеристика при $0 < \alpha < \alpha_{\text{кр}}$ идет по косинусу, соответствующей режиму непрерывного тока, а при $\alpha > \alpha_{\text{кр}1}$ она идет выше (штриховая линия на рис. 32.13, построенная для случая $m=3$).

В управляемом выпрямителе длительность процесса коммутации зависит от угла управления α :

$$\gamma = \arccos \left[\cos \alpha - \frac{I_d X_a}{\sqrt{2} E_2 \sin \pi/m} \right] - \alpha.$$

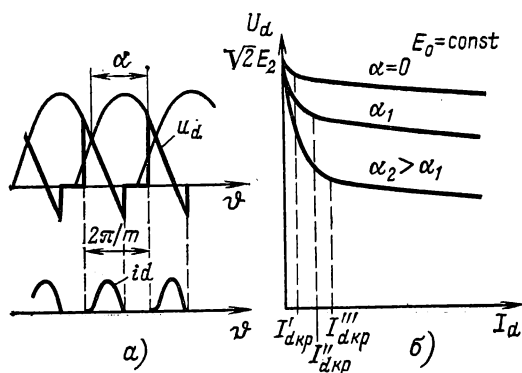


Рис. 32.14. Режим разрывного тока управляемого выпрямителя

Внешняя характеристика управляемого выпрямителя при режиме непрерывного тока определяется выражением (см. линии 2 и 3 на рис. 32.10)

$$U_{dxy} = U_{d0} \cos \alpha - \frac{mX_a}{2\pi} I_d;$$

или в относительных единицах:

$$\frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}} = \cos \alpha - \frac{A u_{\%}}{100 \% I_{d\text{ном}}} I_d.$$

Работа выпрямителей на противо-ЭДС

При наличии в цепи нагрузки выпрямительного противо-ЭДС E_d (якорь двигателя постоянного тока, аккумуляторная батарея, электролизная или гальваническая ванна) пульсации выпрямленного тока увеличиваются. Когда амплитуда пульсаций тока становится равной среднему значению I_d , выпрямитель переходит в режим разрывного тока. Критический угол управления $\alpha_{кр}$, определяющий переход в такой режим, при $E_d \neq 0$ меньше угла $\alpha_{кр1}$, определенного при $E_d = 0$ и конечном значении X_d/R_d .

При работе в режиме разрывного тока (рис. 32.14, а) внешняя характеристика идет круче, чем при непрерывном токе (рис. 32.14, б), что объясняется уменьшением отрицательных площадей в кривой U_d (рис. 32.14, а) по мере снижения I_d . Из-за резкого подъема U_d при $I_d < I_{dkp}$ такой режим обычно нежелателен; для его устранения надо либо увеличить индуктивность X_d в цепи постоянного тока, либо ограничить угол α достаточно небольшими значениями (подробнее см. [32.33]).

32.10. МНОГОФАЗНЫЕ СОСТАВНЫЕ СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

При больших мощностях нагрузки дважды трехфазная с уравнительным реактором и трехфазная мостовая схемы выпрямления уже не могут обеспечить выполнение следующих требований:

1) получение заданной мощности в нагрузке без использования параллельного или последовательного соединения вентилей;

2) достаточно малое содержание высших гармоник в кривой тока, потребляемого выпрямителем от питающей сети.

Решение этих задач возможно с помощью составных (комбинированных) схем, представляющих собой последовательное или параллельное соединение нескольких рассмотренных выше схем выпрямления.

Для получения кривой потребляемого от сети тока и пульсаций выпрямленного напряжения, соответствующих 12-фазной схеме ($m=12$), можно соединить последовательно по цепи постоянного тока две трехфазные мостовые схемы (рис. 32.15, а), при этом переменные напряжения, подводимые к выпрямительным мостам, должны быть сдвинуты относительно друг друга на угол $\psi = 360^\circ/m = 30^\circ$. Такой фазовый сдвиг можно получить за счет соединения сетевых или вентильных обмоток одного выпрямительного трансформатора в звезду, а другого — в треугольник. Для того чтобы выпрямленные напряжения обоих мостов были равны, коэффициент трансформации трансформатора первого моста $k_{тр1} = w_2/w_1$ должен быть в $\sqrt{3}$ раз больше, чем коэффициент трансформации $k_{трII}$ трансформатора второго моста. Для питания выпрямительных мостов этой схемы может быть использован и один трехфазный трансформатор с двумя группами вентильных обмоток: одна группа соединена в звезду, вторая — в треугольник.

Графики изменения токов и напряжений в схеме рис. 32.15, а приведены на рис. 32.15, б. Поскольку выходные напряжения каждого из мостов равны, напряжение на нагрузке в 2 раза выше, чем напряжение на выходе каждого моста:

$$U_d = 2U_{dI} = 2U_{dII}.$$

В кривой результирующего тока $I_{\Sigma IA}$ потребляемого от фазы А питающей сети, содержатся гармоники высоких порядков, соответствующие 12-фазной схеме, а именно: 11, 13, 23, 25 и т. д. (см. § 32.4), т. е. кривая тока по сравнению с кривой тока трехфазного мостового выпрямителя улучшилась.

При расчете схемы можно считать, что выпрямительные мосты работают независимо друг от друга, и, следовательно, можно пользоваться соотношениями, приведенными в табл. 32.3 для трехфазной мостовой схемы. При определении $k_{тр}$ и $U_{обр\text{мах}}$ надо учитывать, что на выходе каждого моста имеем $U_{dI,II} = 0,5 U_d$.

Для создания эквивалентного 24-фазного режима необходимо соединить последовательно четыре выпрямительных моста. Каждая пара мостов, как и в предыдущем случае, работает в 12-фазном режиме выпрямления. Для обеспечения дополнительного фазового сдвига переменного напряжения, подводимого к трансформаторам второй 12-фазной схемы, по отношению к первой на угол $\psi = 360^\circ/m = 15^\circ$ необходимо включить дополнительный фазосдвигающий трансформатор ФТ (рис. 32.16). Такая 24-фазная схема выпрямления позволяет без последовательного соединения вентилей получить на нагрузке напряжение, в 4 раза превышающее напряжение каждого трехфазного мо-

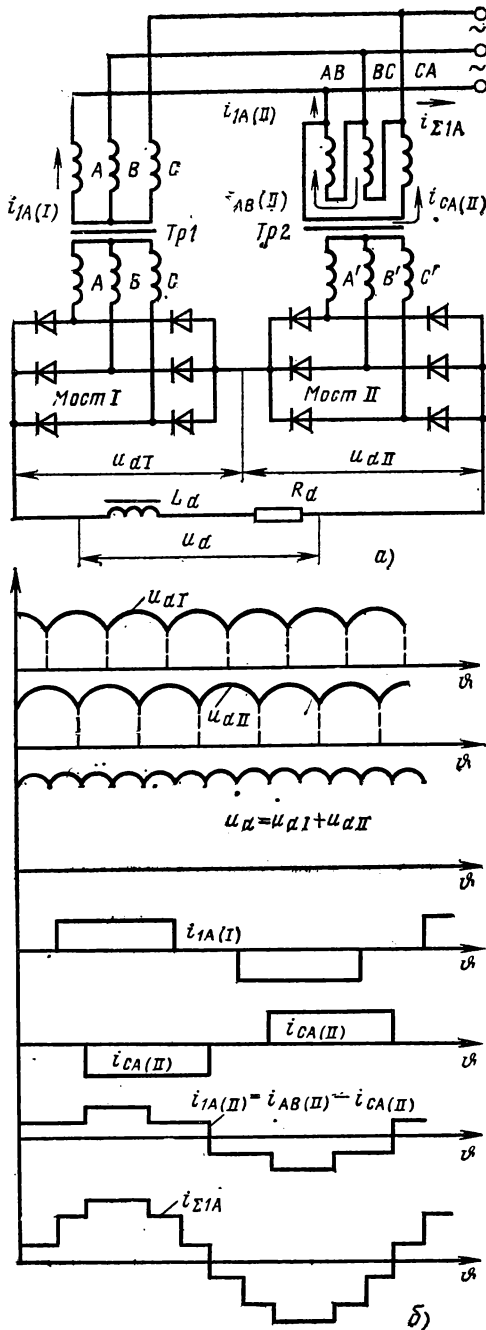


Рис. 32.15. Комбинированная 12-фазная схема выпрямления с последовательным соединением двух трехфазных мостовых схем (а) и временные диаграммы напряжений и токов (б)

ста при сохранении неизменным тока нагрузки. Результирующий ток, потребляемый выпрямителем от питающей сети, еще больше приближается к синусоиде, так как в его состав входят гармоники еще более высоких порядков: 23-, 25-, 47-, 49-я и т. д. Кривая результирующего выпрямленного напряжения также имеет

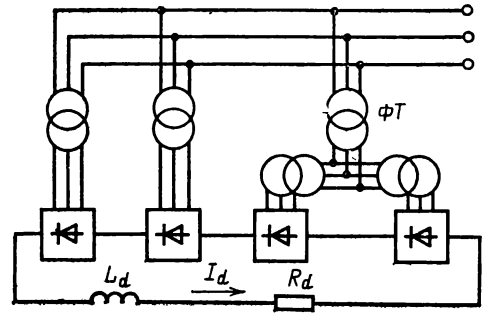


Рис. 32.16. Комбинированная 24-фазная схема выпрямления с последовательным соединением четырех трехфазных мостовых схем

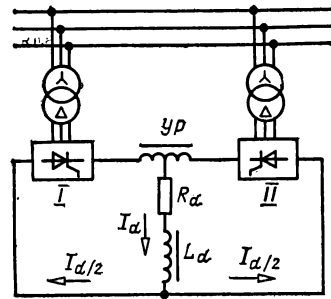


Рис. 32.17. Комбинированная 12-фазная схема выпрямления с параллельным соединением двух трехфазных мостовых схем

весьма низкие пульсации: коэффициент пульсаций по наиболее низкочастотной гармонике (с частотой $50 \cdot 24 = 1200$ Гц) составляет $q_{(1)} = \frac{2}{24^2 - 1} 100\% = 0,35\%$.

Для получения больших токов в нагрузке (при сохранении того же напряжения U_d) с одновременным увеличением числа фаз выпрямления m целесообразно параллельное соединение нескольких мостовых схем с созданием таким же образом необходимого фазового сдвига $\psi = 360^\circ/m$ между переменными напряжениями, подаваемыми на каждый мост (рис. 32.17). При этом между отдельными мостами включается уравнивающий реактор U_P , который принимает на себя разность мгновенных значений выпрямленных напряжений каждого моста, обусловленную взаимным фазовым сдвигом переменных напряжений, и ограничивает тем самым уравнивающий ток $i_{ур} = (u_{d1} - u_{d2})/\omega L_{ур}$. Расчет схемы аналогичен расчету обычной мостовой схемы с учетом того, что среднее значение тока каждого из мостов $I_{d(I,II)} = 0,5 I_d$.

Используя параллельное соединение большего числа выпрямительных мостов, можно получить схемы выпрямления, соответствующие 24-, 36-фазному режимам и т. д.

Хорошим примером составного выпрямителя, основанного на использовании параллельного соединения двух трехфазных нулевых схем со сдвинутыми на 60° переменными напряжениями, является дважды трехфазная схема с уравнивающим реактором (2-й и 3-й

столбцы табл. 32.4). Такой выпрямитель, составленный из двух параллельно работающих трехфазных нулевых схем, эквивалентен шести-фазному. Эта схема широко применялась со ртутными вентилями, а при применении полупроводниковых вентилях ее целесообразно использовать при больших токах и относительно невысоких напряжениях (десятки и сотни вольт).

В управляемых составных выпрямителях необходимо системы управления отдельных «элементарных» преобразователей, работающих со взаимным фазовым сдвигом $\varphi = 360^\circ/m$, сфазировать с соответствующими переменными напряжениями, поданными на каждый из этих преобразователей.

32.11. ВЕДОМЫЕ СЕТЬЮ (ЗАВИСИМЫЕ) ИНВЕРТОРЫ

Инвертированием тока называется процесс преобразования постоянного тока в переменный, т. е. процесс, обратный выпрямлению тока.

Перевод однокомплектного вентильного преобразователя (т. е. состоящего из одного комплекта вентилях, обеспечивающих протекание постоянного тока в одном направлении) из выпрямительного режима в инверторный осуществляется путем изменения полярности постоянного напряжения при сохранении направления постоянного тока. В инверторах, ведомых сетью, коммутация тока вентиля одной фазы на вентиль другой фазы обеспечивается, как и в выпрямителях, напряжением источника переменной ЭДС приемной сети.

Нулевая схема однофазного двухполупериодного инвертора, ведомого сетью, приведена на рис. 32.18.

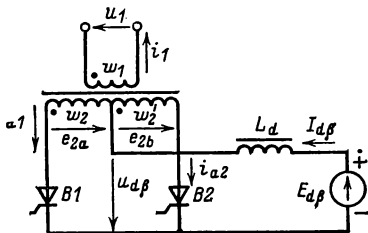


Рис. 32.18. Нулевая схема однофазного зависимого инвертора

Для осуществления инверторного режима необходимо, чтобы ток и ЭДС в сетевой обмотке w_1 имели на большей части периода одинаковое направление, что означает отдачу энергии в сеть переменного тока. Для выполнения этого условия вентили должны пропускать ток преимущественно при отрицательной полуволне переменной ЭДС в вентильных полуобмотках w_2 и w_2' инверторного трансформатора. При этом протекание тока через вентиль происходит под действием разности напряжения источника постоянного тока $E_{дб}$ и соответствующей ЭДС e_{2a} , e_{2b} . Временные диаграммы напряжений и токов, иллюстрирующие работу схемы, приведены на рис. 32.19.

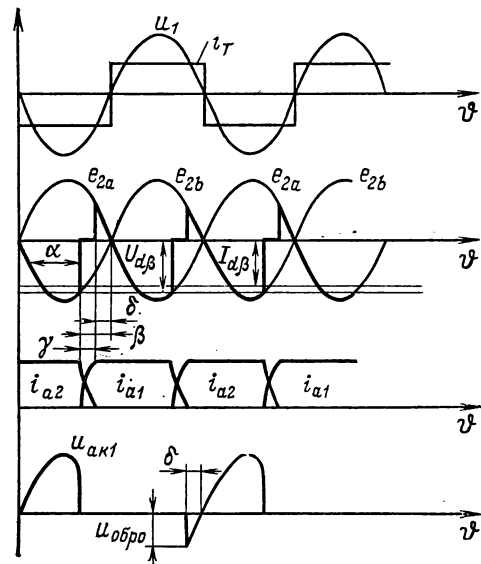


Рис. 32.19. Временные диаграммы напряжений и токов в схеме рис. 32.18

Каждый вентиль включается с опережением на угол $0 < \beta < \pi/2$ относительно начала отрицательного полупериода (причем $\beta = \pi - \alpha$, где $\alpha > \pi/2$ — угол управления или угол задержки отпирания, отсчитываемый относительно начала положительного полупериода). Условие $\beta > 0$ обусловлено необходимостью прекратить прохождение тока через ранее проводивший вентиль и обеспечить его запираание до начала положительной полуволны e_2 в соответствующей вентильной полуобмотке. Если это условие не выполняется, этот вентиль продолжает проводить ток наряду с вновь включившимся, что не только приводит к нарушению поочередной коммутации вентилях, необходимой для инвертирования, но и вызывает короткое замыкание источника $E_{дб}$ и сети переменного тока через два одновременно открытых вентиля. Такой процесс называется опрокидыванием или срывом инвертора.

При включении очередного вентиля в момент, определяемый углом опережения β , начинается процесс коммутации и ток с предыдущего вентиля в течение угла γ переходит на следующий, так как потенциал его анода выше, чем у ранее проводившего ток вентиля. Для запираания каждого вентиля необходимо не только уменьшение до нуля его анодного тока, но и обеспечение необходимого времени, в течение которого к вентилю прикладывается обратное напряжение и он восстанавливает свои запирающие свойства до того, как к нему будет опять приложено положительное напряжение; это время определяется углом δ (рис. 32.19).

Таким образом, для нормальной работы инвертора необходимо, чтобы $\delta \geq \delta_{кр}$ и

$$\beta = \gamma + \delta \geq \gamma + \delta_{кр},$$

где $\delta_{кр} = t_q \cdot 2\pi f_c$; t_q — время выключения данного конкретного вентиля, необходимое для

восстановления его запирающих свойств (указывается в паспорте прибора).

Сглаживающий дроссель L_d воспринимает разность напряжения источника питания $E_{d\beta}$ и мгновенного значения противо-ЭДС инвертора $e_{d\beta}$ (показано жирной линией на второй диаграмме сверху на рис. 32.19).

Среднее значение инвертируемого тока $I_{d\beta}$ при бесконечно большой индуктивности сглаживающего дросселя L_d связано с углами β и γ следующей зависимостью:

$$I_{d\beta} = \frac{\sqrt{2} E_2}{X_a} [\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta],$$

где X_a — анодная индуктивность, определяемая в основном индуктивностью рассеяния обмоток инверторного трансформатора; E_2 — действующее значение напряжения фазы трансформатора.

Среднее значение противо-ЭДС инвертора $U_{d\beta}$, которое уравнивает питающее постоянное напряжение $E_{d\beta}$, определяется соотношением

$$\begin{aligned} E_{d\beta} = U_{d\beta} &= \frac{1}{\pi} \int_{-\beta+\gamma}^{\pi-\beta} 2\sqrt{2} E_2 \sin \vartheta d\vartheta = \\ &= U_{d0} \left[\frac{\cos(\beta - \gamma) + \cos \beta}{2} \right]. \end{aligned}$$

Связь питающего инвертор напряжения $E_{d\beta}$ и тока $I_{d\beta}$ называют входной характеристикой инвертора. Уравнение этой характеристики без учета падения напряжения в вентилях и активных сопротивлений схемы для m -фазного инвертора имеет вид:

$$E_{d\beta} = U_{d0} \cos \beta + \frac{mX_a}{2\pi} I_{d\beta}.$$

В этом соотношении первый член $U_{d0} \cos \beta$ — противо-ЭДС инвертора при данном угле β и холостом ходе (когда $\gamma=0$); второй член $\frac{mX_a}{2\pi} I_{d\beta}$ — добавка напряжения, необходимая с учетом явления перекрытия токов в течение угла γ при коммутации.

Входные характеристики ведомого сетью инвертора приведены на рис. 32.20. На том же рисунке точечными линиями показаны начальные участки входных характеристик при малых значениях тока $I_{d\beta}$ и индуктивности $L_{d\beta}$, когда входной ток имеет прерывистый характер.

Рабочая область на входных характеристиках лежит ниже ограничительной характеристики инвертора (линии I на рис. 32.20), которая определяет геометрическое место точек, соответствующих предельно возможным значениям $I_{d\beta}$ и $E_{d\beta}$ при заданном угле восстановления $\delta = \delta_{кр}$ и различных углах β . Ограничительная характеристика описывается выражением

$$E_{d\beta\text{пред}} = U_{d0} \cos \delta_{кр} - \frac{mX_a}{2\pi} I_{d\beta}.$$

Очевидно, что при $\beta < \delta_{кр}$ работа инвертора невозможна. При $\beta = \delta_{кр}$ теоретически можно

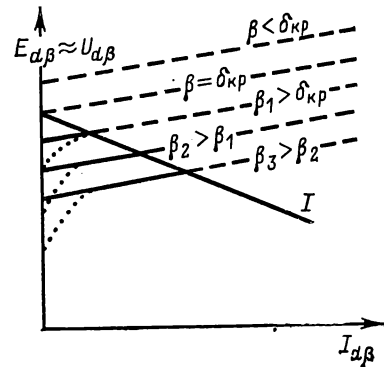


Рис. 32.20. Входные характеристики инвертора, ведомого сетью

работать лишь при токе $I_{d\beta} = 0$, так как стоит увеличить ток, как появится угол коммутации γ и угол δ станет меньше $\delta_{кр}$ (пунктир на рис. 32.20). Следовательно, при $I_{d\beta} > 0$ можно работать при таких углах β , чтобы находиться в области, расположенной ниже линии I на рис. 32.20 (сплошные линии).

32.12. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Коэффициент мощности преобразовательной установки характеризует соотношение потребляемой от сети (или отдаваемой в сеть в случае инвертора) переменной мощности к полной мощности

$$\chi = P/S,$$

где в случае синусоидального (без искажений) напряжения сети $P = U_1 I_{(1)} \cos \varphi_{(1)}$ — активная мощность; $I_{(1)}$ — действующее значение первой гармоники сетевого тока; $\varphi_{(1)}$ — угол сдвига между первой гармоникой тока сети и синусоидой напряжения сети; $S = U_1 I_1$ — полная мощность переменного тока, определяемая произведением действующих значений напряжения и тока.

Коэффициент мощности любого преобразователя всегда меньше единицы, так как кривая тока сети отличается от синусоиды, а его первая гармоника сдвинута по фазе по отношению к синусоиде напряжения сети. Наличие фазового сдвига, обусловленного явлением перекрытия токов вентилей при коммутации и фазовым регулированием выпрямленного напряжения, свидетельствует о том, что преобразователь потребляет от сети реактивную мощность. Потребление реактивной мощности и наличие в сети кривой тока высших гармонических приводит к увеличению действующего значения тока сети и росту потерь в сети переменного тока при передаче энергии от сети к преобразователю (или в обратном направлении).

Коэффициент мощности преобразовательной установки

$$\chi = k_1 \cos \varphi_{(1)},$$

где k_I — коэффициент искажения формы тока сети, определяемый наличием высших гармонических:

$$k_I = \frac{I_{(1)}}{I_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{n=k, m \pm 1}^{\infty} \frac{I_n^2}{I_{(1)}^2}}},$$

где $k = 1, 2, 3 \dots$

Коэффициент искажений зависит от числа фаз преобразования m и в предположении, что угол перекрытия $\gamma = 0$, составляет:

$m=3$	$k_I = 0,935$
$m=6$	$k_I = 0,955$
$m=12$	$k_I = 0,988$

Коэффициент сдвига $\cos \varphi_{(1)}$ определяется углом сдвига первой гармоники тока сети по отношению к синусоиде напряжения сети. Угол коммутации γ вызывает дополнительный фазовый сдвиг первой гармоники сетевого тока в сторону отставания, поэтому у выпрямителя $\cos \varphi_{(1)} \approx \cos(\alpha + \gamma/2)$. Так как в инверторе угол β отсчитывается в сторону опережения, $\cos \varphi_{(1)} \approx \cos(\beta - \gamma/2)$.

Таким образом, коэффициент мощности выпрямителя составляет

$$\chi = k_I \cos(\alpha + \gamma/2),$$

а инвертора

$$\chi = k_I \cos(\beta - \gamma/2).$$

32.13. СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Значительное снижение коэффициента мощности при глубоком фазовом регулировании как выпрямителей, так и зависимых инверторов заставляет заниматься вопросом улучшения энергетических показателей управляемых вентильных преобразователей. Улучшение коэффициента мощности требуется также и в установках с небольшим диапазоном регулирования. Однако способы повышения коэффициента мощности в зависимости от глубины регулирования могут быть разными.

Одним из способов является применение специальных трансформаторов (или автотрансформаторов) с переключением отводов на первичной или вторичной стороне; при таком ступенчатом регулировании напряжения преобразователя коэффициент мощности установки не ухудшается. Этот способ изменения выходного напряжения может сочетаться с переключением обмоток трансформатора от схемы звезда к треугольнику и обратно. Плавное регулирование напряжения в пределах каждой ступени осуществляется за счет изменения угла управления, однако диапазон такого изменения при достаточно большом числе ступеней получается небольшим. Поэтому при таком фазоступенчатом регулировании напряжения преобразователя ухудшение его коэффициента мощности также может быть небольшим.

Некоторое снижение реактивной мощности, потребляемой управляемыми выпрямителями, достигается при шунтировании нагрузки диодами (схемы с «нулевыми» вентилями) или при применении несимметричных («полууправляемых») мостовых схем, а также при использовании рациональных алгоритмов управления вентилями (подробнее эти методы рассмотрены в § 32.15 и 32.16).

Для компенсации реактивной мощности, потребляемой преобразователями, применяют синхронные двигатели или конденсаторы с регулируемым возбуждением, которые подключают к этой же сети переменного тока. Основными недостатками синхронных конденсаторов являются сравнительно высокие эксплуатационные расходы, что обусловлено необходимостью ухода и наблюдения в связи с наличием вращающихся частей, и заметные потери мощности (порядка 2—4 %).

Компенсирующие конденсаторы имеют значительно меньшие потери и почти не требуют ухода, их основным недостатком является невозможность плавного регулирования реактивной мощности.

С целью ступенчатого регулирования реактивной мощности, генерируемой конденсаторными батареями, последние разбивают на секции, которые подключаются в работу с помощью тиристоров (рис. 32.21), т. е. бесконтактным способом. Плавное регулирование реактив-

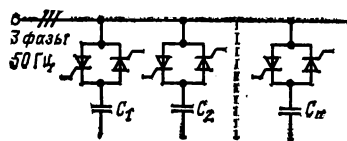


Рис. 32.21. Ступенчатое регулирование емкости компенсирующих батарей конденсаторов с помощью тиристорных переключателей:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + \dots + C_n; \text{ иногда } C_1 : C_2 : \dots : C_n = 1 : 2 : \dots : 2^{n-1}$$

ной мощности достигается в статических источниках реактивной мощности (ИРМ), основанных на применении конденсаторов и индуктивно-тиристорных регуляторов реактивного тока ИРТ (рис. 32.22). За счет изменения угла управления тиристорами ИРТ осуществляется регулирование индуктивного тока в цепи реактора L , и, таким образом, ИРТ может рассматриваться по первой гармонике как плавное регулируемая индуктивность, компенсирующая ту или иную часть реактивной мощности, гене-

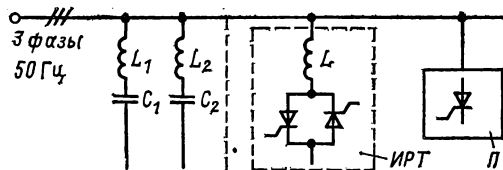


Рис. 32.22. Схемы фильтрокомпенсирующего устройства с индуктивно-тиристорным регулятором реактивного тока (в однолинейном изображении)

рируемой конденсаторами. Конденсаторы в таких установках обычно разбивают на секции $C_1, C_2 \dots$, включают последовательно с секциями реакторы $L_1, L_2 \dots$ (рис. 32.22) и выбирают собственную частоту каждой такой LC -цепочки с резонансом напряжений равной частоте одной из гармоник выходного тока преобразователя $f_2 = (km \pm 1)f_c$ (где $k=1, 2, 3 \dots$). В подобных установках осуществляется одновременно компенсация потребляемой преобразователем (или другими потребителями) реактивной мощности по первой (основной) гармонике (поскольку сопротивление реакторов $L_1, L_2 \dots$ для тока первой гармоники незначительно) и фильтрация высших гармоник тока, генерируемых преобразователем в питающую сеть. Такие комплексные фильтрокомпенсирующие устройства в настоящее время находят все более широкое применение.

В преобразователях с искусственной (принудительной) коммутацией, осуществляемой за счет введения конденсаторов в силовую цепь, момент коммутации вентилей при фазовом управлении может быть сдвинут не в сторону отставания, как обычно (см. рис. 32.12), а в сторону опережения относительно точки пересечения синусоид фазовых или линейных напряжений. В этом случае основная гармоника переменного тока преобразователя будет опережать синусоиду напряжения сети и, следовательно, преобразователь будет генерировать реактивную мощность в сеть. Несмотря на большое число схем описанных в литературе подобных компенсированных преобразователей (см., например, [32.34, с. 66–71]), они до последнего времени не нашли широкого применения на практике в силу сложности, ухудшения регулировочных или нагрузочных характеристик или возможности возникновения перенапряжений на вентилях в некоторых режимах.

32.14. ВЫПРЯМИТЕЛИ С НУЛЕВЫМ ВЕНТИЛЕМ И НЕСИММЕТРИЧНЫЕ МОСТОВЫЕ СХЕМЫ

Некоторое улучшение коэффициента мощности управляемого выпрямителя может быть достигнуто, если цепь нагрузки, содержащую значительную индуктивность, шунтировать диодом VD_0 (рис. 32.23, а). Такой диод, называемый «нулевым» (или шунтирующим), будет от-

пираться в однофазной двухполупериодной нулевой или мостовой схеме в моменты перехода переменного напряжения через нуль, в результате чего в кривой выпрямленного напряжения u_d будут отсутствовать площадки с отрицательным напряжением (рис. 32.23, б), имеющиеся при работе обычного управляемого выпрямителя при $\alpha=0$, что означает снижение пульсаций u_d и i_d . Среднее значение выпрямленного напряжения при этом равно

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} E_2 \sin \vartheta d\vartheta = U_{d0} \frac{(1 + \cos \alpha)}{2}.$$

Следовательно, для регулирования напряжения в полном диапазоне от U_{d0} до нуля необходимо угол α изменять в диапазоне $0 \dots 180^\circ$ (как при чисто активной нагрузке в выпрямителе с полным числом управляемых вентилей — см. кривую при $m=2$ на рис. 32.13). Длительность импульсов анодного тока и, следовательно, тока, потребляемого от сети, при наличии нулевого диода получается равной $\pi - \alpha$ (рис. 32.23, в). При этом первая гармоника первичного тока выпрямителя $i_{c(1)}$ сдвинута относительно синусоиды напряжения сети на угол $\varphi_{(1)} = \alpha/2$ (в предположении, что угол коммутации $\gamma=0$) и, следовательно, коэффициент сдвига равен

$$\cos \varphi_{(1)} = \cos \alpha/2.$$

Коэффициент искажения кривой тока

$$\nu = \frac{I_{(1)}}{I} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{\cos \alpha/2}{\sqrt{1 - \alpha/\pi}}$$

и коэффициент мощности

$$\chi = \nu \cos \varphi_{(1)} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{\sqrt{1 - \alpha/\pi}}.$$

На рис. 32.24 показаны зависимости коэффициентов ν , $\cos \varphi_{(1)}$ и χ от степени управления $G = U_{d\alpha}/U_{d0}$ для рассматриваемого случая. Там же штриховой линией показана зависимость $\chi = f(G)$ для однофазного мостового выпрямителя с полным числом управляемых вентилей (у которого $\nu = 2\sqrt{2}/\pi = \text{const}$). Видно, что до- бавление нулевого диода позволяет практиче-

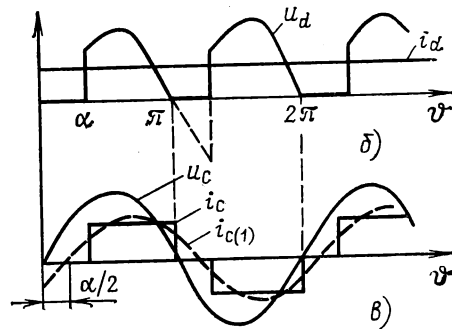
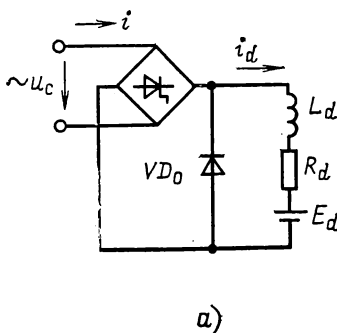


Рис. 32.23. Схема выпрямителя с шунтирующим («нулевым») диодом (а) и диаграммы напряжений и токов (б и в)

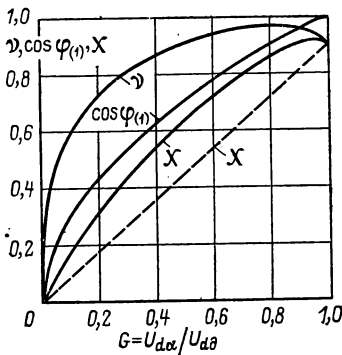


Рис. 32.24. Зависимости коэффициентов искажения потребляемого тока χ , сдвига $\cos \varphi(1)$ и мощности $\chi(1)$ от степени регулирования напряжения для однофазных выпрямителей с нулевым диодом или для однофазных мостовых несимметричных выпрямителей (сплошные линии) и коэффициента χ для обычных однофазных выпрямителей (штриховая линия)

ски во всем диапазоне регулирования поднять коэффициент мощности на 0,15—0,2.

При переходе к выпрямителям с большим числом m ($m=3$ и тем более $m=6$) влияние нулевого диода снижается.

Другой, но схожий по результатам, способ улучшения коэффициента мощности связан с применением несимметричных мостовых схем, в которых половина вентилей является управляемыми, половина — неуправляемыми; такие схемы иногда называют «полууправляемыми».

На рис. 32.25, а и в показаны два варианта однофазных несимметричных выпрямителя, а на рис. 32.25, б и г — соответствующие диаграммы напряжений и токов. Видно, что в обеих схемах кривая выпрямленного напряжения U_d и кривая потребляемого от сети тока имеют такой же вид, как у однофазного выпрямителя с «нулевым» диодом. Поэтому и все соотношения, приведенные выше для последней схемы, а также зависимости на рис. 32.24 справедливы и для обоих выпрямителей по рис. 32.25, а и в.

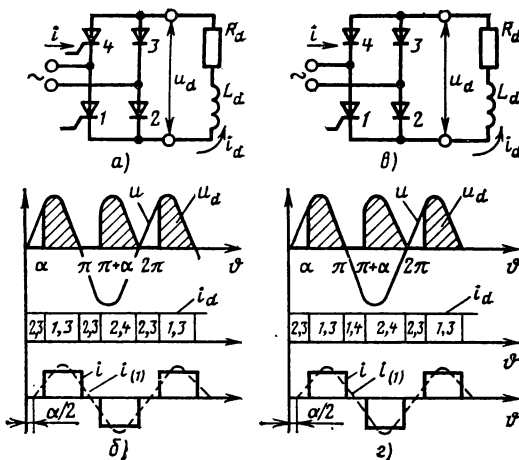


Рис. 32.25. Однофазные мостовые несимметричные («полууправляемые») выпрямители (а и в) и диаграммы напряжений и токов (б и г)

Из рассмотрения последовательности работы вентилей (см. диаграммы для тока i_d на рис. 32.25, б и г) видно различие для этих двух несимметричных выпрямителей. В схеме рис. 32.25, а оба диода 2 и 3 отпираются каждый полупериод и проводят ток во время пауз в кривой u_d , играя тем самым роль нулевого диода. При этом длительность работы каждого диода равна $\pi + \alpha$, в то время как длительность работы каждого тиристора составляет $\pi - \alpha$, т. е. токовая нагрузка вентилей не одинакова. Этот недостаток отсутствует в схеме рис. 32.25, в, где интервалы проводимости всех четырех вентилей равны π . Кроме того, в последней схеме оба тиристора имеют эквипотенциальные катоды и могут управляться от одного блока управления без разделительных трансформаторов.

В трехфазном мостовом несимметричном выпрямителе (схема по рис. 32.2, д при использовании в качестве вентилей $VD1, VD3, VD5$ тиристоров) напряжение между нулевой точкой вторичных обмоток трансформатора и точкой a (общей шиной анодов диодов) изменяется так же, как в неуправляемом трехфазном нулевом выпрямителе, а напряжение между нулевой точкой вторичных обмоток трансформатора и общей точкой b (общей шиной катодов тиристоров), как в таком же управляемом выпрямителе (кривые u_{a0} и u_{b0} на рис. 32.26, а). Напряжение на нагрузке $u_{d\alpha}$ равно разности мгновенных значений u_{b0} и u_{a0} (рис. 32.26, б). Среднее значение напряжения на нагрузке

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \text{ где } U_{d0} = 2,34 E_{2\text{ф}}.$$

При $\alpha > 60^\circ$ на некотором интервале мгновенное значение напряжения на нагрузке оказывается равным нулю. При этом в случае чисто активной нагрузки ток падает до нуля. При активно-индуктивной нагрузке ток i_d может оставаться и непрерывным, замыкаясь через два вентили, подключенных к одной фазе (например, через диод $VD4$ и тиристор $VD1$, см. рис. 32.2, д).

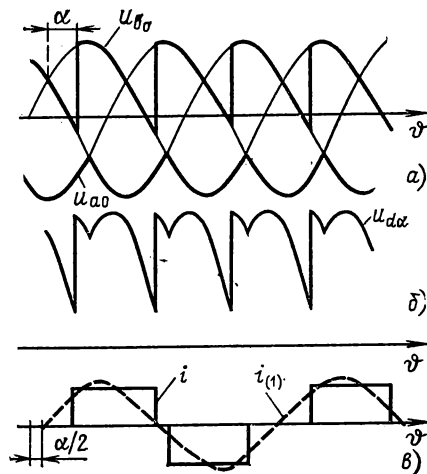


Рис. 32.26. Диаграммы напряжений и тока в трехфазном мостовом несимметричном «полууправляемом» выпрямителе

На рис. 32.26, в показаны кривая потребляемого от сети тока i и его первая гармоника $i_{(1)}$, сдвиг которой относительно напряжения сети определяется углом $\varphi_{(1)} = \alpha/2$. Следовательно, $\cos \alpha_{(1)} = \cos \alpha/2$.

Действующее значение первой гармоники тока (при $k_r = 1$)

$$I_{(1)} = \frac{\sqrt{6} I_d}{\pi} \cos \alpha/2,$$

причем это выражение, как и выражение для коэффициента сдвига, справедливо во всем диапазоне изменения α от 0 до 180° . Действующее значение потребляемого тока при $\alpha < \pi/3$ (этот случай показан на рис. 32.26) неизмен-

но и равно $I = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$. Следовательно, при $\alpha < \pi/3$

$$v = \frac{3}{\pi} \cos \frac{\alpha}{2};$$

$$\chi = \frac{3}{\pi} \cos^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{3}{\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

В диапазоне

$$\pi/3 < \alpha < \pi$$

$$I = I_d \sqrt{1 - \alpha/\pi}; \quad v = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \frac{\cos \alpha/2}{\sqrt{1 - \alpha/\pi}};$$

$$\chi = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1 + \cos \alpha}{\pi \sqrt{1 - \alpha/\pi}}.$$

На рис. 32.27 кривая 2 соответствует зависимости $\chi = f(U_{d\alpha}/U_{d0})$, линия 1 показывает аналогичную зависимость для симметричного выпрямителя, когда коэффициент мощности уменьшается пропорционально снижению выпрямленного напряжения. Сопоставление этих кривых показывает, что в диапазоне $U_{d\alpha}/U_{d0}$ от 0,6 до 0,1 несимметричный мостовой выпрямитель дает увеличение коэффициента мощности на 0,07–0,1.

Поскольку в несимметричных схемах половина вентилей — диоды, инверторный режим в таких схемах, как и в схемах с нулевым диодом, невозможен.

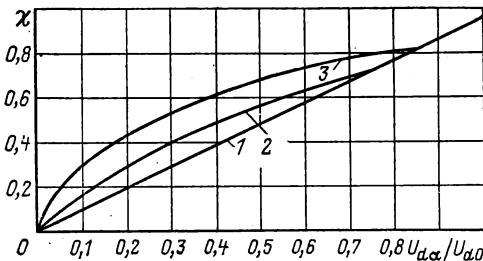


Рис. 32.27. Зависимости коэффициента мощности трехфазного мостового управляющего выпрямителя от выходного напряжения при различных алгоритмах управления

К несимметричным мостовым можно также отнести схемы, в которых одна группа (анодная либо катодная) состоит из обычных незапираемых тиристоров, а другая — из запираемых (двухоперационных) тиристоров либо из незапираемых тиристоров с узлами принудительной коммутации, и поэтому угол управления вентилей этой группы может изменяться в сторону опережения. Если управление мостовым преобразователем осуществлять таким образом, что опережающий угол управления, например катодной группой вентилей, равен отстающему углу управления анодной группой вентилей во всем диапазоне регулирования выходного напряжения, то сдвиг между первой гармоникой сетевого тока и напряжением питающей сети будет отсутствовать. Это означает, что при равенстве абсолютных значений углов управления потребляемые из сети реактивные мощности сдвига емкостного и индуктивного характера компенсируются и из питающей сети потребляется только реактивная мощность искажений, обусловленная несинусоидальностью потребляемого тока.

В трехфазной мостовой схеме при углах регулирования $\alpha < \pi/6$ относительное действующее значение входного тока не зависит от α , поэтому на данном интервале регулирования коэффициент мощности с ростом α уменьшается линейно

$$\chi = \frac{3}{\pi} \frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}}, \quad 0 \leq \alpha \leq \pi/6.$$

При углах регулирования $\alpha > \pi/6$ относительное действующее значение потребляемого тока уменьшается с ростом α :

$$I/I_d = \sqrt{1 - 2\alpha/\pi}.$$

С уменьшением отношения I_c/I_d увеличивается коэффициент мощности

$$\chi = \frac{3/\pi}{\sqrt{1 - 2\alpha/\pi}} \frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}}, \quad \frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}.$$

Зависимость коэффициента мощности от относительного выходного напряжения для данного случая представлена на рис. 32.27 (кривая 3).

32.15. АЛГОРИТМЫ ПООЧЕРЕДНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ВЕДОМЫХ СЕТЬЮ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Если различные группы вентилей в преобразователе отпираются с различными углами (отсчитываемыми, как обычно, относительно моментов отпирания в неуправляемом выпрямителе), управление называют поочередным. При таком алгоритме управления весь диапазон регулирования напряжения разбивают на поддиапазоны, в каждом из которых регулирование осуществляется путем изменения угла у соответствующей группы вентилей, а у другой группы (других групп) углы остаются неизменными.

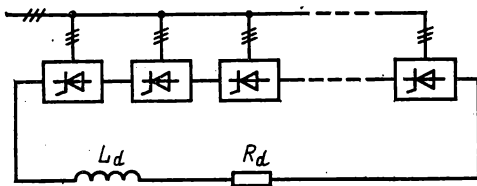


Рис. 32.28. Структурная схема каскадного соединения преобразователей

Рассмотрим общий случай поочередного регулирования, когда преобразовательная установка состоит из n последовательно соединенных мостовых блоков (мостов) (рис. 32.28) и на данном интервале регулирования выходного напряжения изменяется угол управления m -го моста. Для упрощения рассмотрим случай, когда между питающими мосты трехфазными напряжениями отсутствует фазовый сдвиг. Пусть каждый мост управляется симметрично. При этом угол управления каждого моста изменяется в пределах $\alpha=0 \div \pi$, т. е. в процессе регулирования мост переводится из предельного выпрямительного режима в предельный инверторный режим.

Регулировочная характеристика имеет вид:

$$\frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}} = \frac{(n-m) + \cos \alpha}{n}, \quad 0 \leq \alpha \leq \pi.$$

Графическая зависимость коэффициента мощности от выходного напряжения для случая $n=2$ представлена на рис. 32.29 (кривая 1).

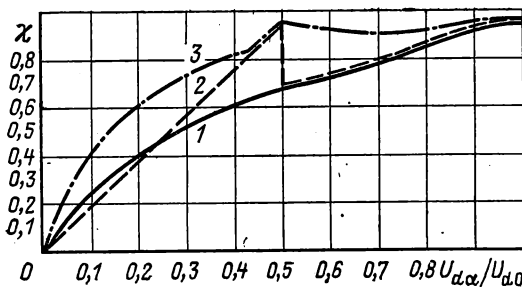


Рис. 32.29. Зависимость коэффициента мощности преобразователя с каскадным соединением выпрямителей от выходного напряжения для различных алгоритмов управления

В [32.19] предлагается способ поочередного управления, при котором углы управления вентилей каждого из мостов изменяются в диапазоне $0 \leq \alpha < \pi/2$, т. е. в процессе регулирования напряжение каждого моста изменяется от максимального до нуля. При достижении углом управления значения $\alpha = \pi/2$ мост шунтируется вентилем и уже не участвует в работе выпрямительной установки. Графические зависимости коэффициента мощности для этого случая представлены на рис. 32.29 (кривая 2).

Применение запираемых вентилей также позволяет повысить коэффициент мощности каскадных схем выпрямления. Если в обоих мостовых выпрямителях вентили одной группы являются запираемыми и их опережающие уг-

лы управления равны по абсолютному значению углам управления вентилем другой группы, зависимость коэффициента мощности от относительного выпрямленного напряжения при поочередном регулировании мостов имеет вид кривой 3 на рис. 32.29.

Применение запираемых вентилей наиболее эффективно при малом числе последовательно соединенных мостов. При увеличении числа мостов можно добиться повышения коэффициента мощности и без принудительного запира вентилей.

Поочередное управление можно использовать также и при одиночной работе мостового тиристорного преобразователя (одно- или трехфазного). Для этого в каждом из двух поддиапазонов регулирования изменяются углы управления вентилей только какой-либо одной группы (анодной или катодной). При этом диапазон изменения угла вентилей одной группы может составлять в пределах $0 \dots \pi$ (как и для каждого моста в каскадной схеме). При таком управлении мостовую схему можно рассматривать как два последовательно соединенных нулевых преобразователя (выпрямителя либо инвертора). При этом в случае $\alpha = \alpha_{min} = \text{const}$ и $\alpha_2 = \pi/2 \div (\pi - \alpha_{min})$ мост работает выпрямителем ($U_{d\alpha} > 0$), при $\alpha_2 = \beta_{min} = \pi - \alpha_{min}$ и $\alpha_1 = \alpha_{min} \div \pi/2$ имеем инверторный режим моста ($U_{d\alpha} < 0$).

Таким образом, при поочередном управлении в мостовой схеме вентили анодной и катодной групп имеют в общем случае различные углы α_1 и α_2 . Для такого преобразователя

$$\frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}} = \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{2};$$

$$\cos \varphi_{(1)} = \cos \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}.$$

Для однофазного преобразователя относительные действующие значения потребляемого от сети тока и его первой гармоники равны (при $n_{тр} = 1$)

$$\frac{I}{I_d} = \sqrt{1 - \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\pi}};$$

$$\frac{I_{(1)}}{I_d} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}.$$

Следовательно,

$$\chi = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{\frac{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)^2}{1 - \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\pi}}}.$$

Для трехфазного мостового преобразователя при аналогичном управлении

$$\frac{I_{(1)}}{I_d} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cos \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}$$

в диапазоне $|\alpha_1 - \alpha_2| < \pi/3$

$$\frac{I}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3}} = \text{const};$$

в диапазоне $|\alpha_1 - \alpha_2| > \pi/3$

$$\frac{I}{I_d} = \sqrt{1 - \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\pi}};$$

$$\chi = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{\pi \sqrt{1 - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\pi}}}.$$

Сопоставление выражений для коэффициента мощности мостовых преобразователей при обычном ($\alpha_1 = \alpha_2$) и поочередном ($\alpha_1 \neq \alpha_2$) управлении показывает, что в последнем случае может быть получен более высокий коэффициент мощности при заданном диапазоне регулирования $U_{d\alpha}/U_{d0}$.

Следует отметить, что описанные в § 32.15 несимметричные («полууправляемые») мостовые схемы можно рассматривать как частный случай поочередного управления, когда $\alpha_2 = 0$ (либо $\alpha_1 = 0$).

32.16. РЕВЕРСИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ДВУМЯ ВЕНТИЛЬНЫМИ КОМПЛЕКТАМИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИМИ ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА ЭНЕРГИИ

Схемы и режимы работы двухкомплектных реверсивных преобразователей

Изменение направления тока в нагрузке, необходимое на практике (реверсивный вентильный электропривод, электротехнология и т. д.), может быть осуществлено без применения переключающих аппаратов с помощью двух комплектов вентилей, каждый из которых обеспечивает протекание тока только в одном направлении.

Все существующие схемы реверсивных преобразователей можно разделить на два класса: перекрестные («восьмерочные») и встречно-параллельные схемы.

В перекрестных схемах (рис. 32.30, а для нулевых схем и б — для мостовых схем) трансформатор имеет две изолированные вентильные обмотки, каждая из которых питает свой комплект вентилей (либо используются два трансформатора).

Во встречно-параллельных схемах (рис. 32.30, в) необходима лишь одна группа вентильных обмоток трансформатора (либо она может даже отсутствовать).

В зависимости от полярности напряжения на нагрузке и направления тока в ней в реверсивном преобразователе возможны следующие режимы:

1. Напряжение и ток совпадают и имеют «прямое» направление — первый комплект вентилей ($УВ1$) работает в выпрямительном режиме (рис. 32.32), при этом угол управления α_1 у вентилей этого комплекта $0 < \alpha_1 < 90^\circ$. Нагрузка потребляет энергию.

2. Напряжение на нагрузке «обратное», но ток в нагрузке продолжает протекать в «прямом» направлении — комплект $УВ1$ работает инвертором ($90^\circ < \alpha_1 < 180^\circ$), энергия из цепи нагрузки отдается в сеть.

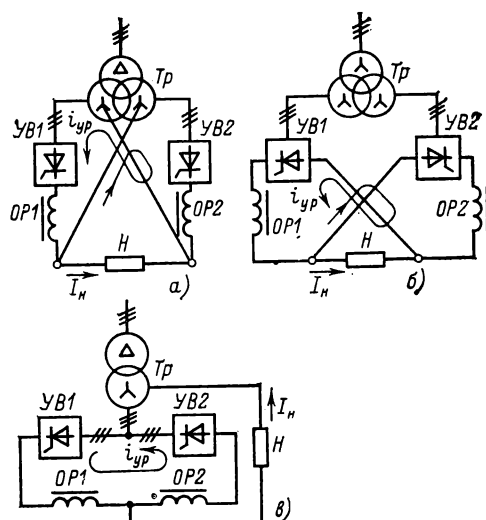


Рис. 32.30. Схемы реверсивных преобразователей: а и б — перекрестные схемы; в — встречно-параллельная схема

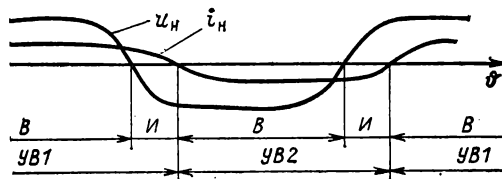


Рис. 32.31. Временные диаграммы напряжения и тока нагрузки реверсивного преобразователя

3. Напряжение и ток нагрузки «обратные» — комплект $УВ2$ работает выпрямителем ($0 < \alpha_2 < 90^\circ$), и нагрузка потребляет энергию.

4. Направление на нагрузке «прямое», а ток в нагрузке «обратный» — $УВ2$ работает в инверторном режиме ($90^\circ < \alpha_2 < 180^\circ$) и нагрузка отдает энергию в сеть.

Перевод преобразователя и нагрузки из одного режима в другой в соответствии с рис. 32.31 может производиться путем воздействия на углы управления вентильными комплектами. Последовательность режимов, показанная на рис. 32.31, характерна для активно-индуктивной нагрузки, например для случая, когда преобразователь питает обмотку возбуждения двигателя или обмотку электромагнита.

На практике возможен и другой порядок следования режимов реверсивного преобразователя, характерный для случая питания цепи машины постоянного тока. Если происходит разгрузка двигателя постоянного тока, включенного в качестве нагрузки в одну из схем рис. 32.30, то напряжение на якоре за счет повышения скорости увеличивается. Вентильный комплект, работавший до этого в выпрямительном режиме (например, $УВ1$), запирается, если его угол α_1 не изменился. Ток нагрузки изменяет свое направление и переходит на другой комплект $УВ2$, который начинает работать в инверторном режиме. Когда вследствие торможения двигателя его ЭДС вновь оказыва-

ется равной напряжению первого комплекта, определяемому старым либо новым значением угла α , этот комплект вновь принимает ток и работает в выпрямительном режиме.

Наиболее распространенными являются реверсивные трехфазная нулевая, дважды трехфазная с уравнительным реактором и трехфазная мостовая схемы. Трехфазные схемы обычно применяются при индуктивной нагрузке (для питания электромагнитов и обмоток возбуждения электрических машин), шести- и двенадцатифазные — для питания якорных цепей двигателя. Для особо мощных приводов могут применяться двенадцатифазные схемы.

В реверсивных преобразователях необходимо, чтобы переход тока от одного вентильного комплекта к другому проходил без пауз, ухудшающих динамическое свойство установки, и чтобы в контуре, образованном обеими группами (в схемах на рис. 32.30 этот контур показан стрелками), отсутствовал непрерывный уравнительный ток, бесполезно загружающий вентили и трансформатор. Эти требования выполняются, если равны постоянные составляющие напряжения комплекта, пропускающего ток нагрузки и работающего в выпрямительном либо инверторном режиме, и другого комплекта, через который ток нагрузки в данный момент не проходит и управление которым подготовлено соответственно к инверторному или выпрямительному режиму. Таким образом,

$$U_{d\alpha} = U_{d\beta}.$$

Однако даже при равенстве средних значений напряжений обоих комплектов их мгновенные значения оказываются неравными (рис. 32.32). Под действием разности мгновенных значений напряжений $U_{d\alpha} - U_{d\beta} = U_{ур}$ в кон-

туре, включающем в себя оба комплекта вентилей, протекает уравнительный ток $i_{ур}$.

Зависимость средних значений напряжений каждого из комплектов вентилей от углов управления этими комплектами α и β (регулирующая характеристика) при непрерывном токе нагрузки и допущении, что коммутация мгновенная, определяется косинусоидальным законом (рис. 32.33):

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cos \alpha;$$

$$U_{d\beta} = U_{d0} \cos \beta.$$

При равенстве средних значений напряжений

$$U_{d0} \cos \alpha = U_{d0} \cos \beta$$

углы равны: $\alpha = \beta$, а ток $i_{ур}$ имеет начально-непрерывный характер (см. рис. 32.32).

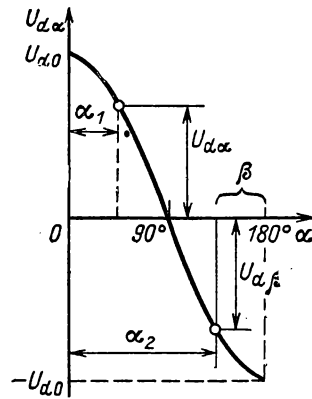


Рис. 32.33. Регулирующая характеристика

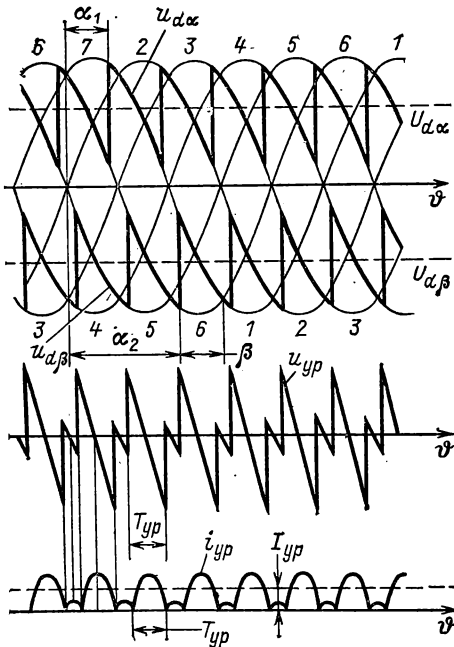


Рис. 32.32. Временные диаграммы напряжений и тока в схеме реверсивного преобразователя рис. 32.30, а

Последнее выражение, обеспечивающее равенство средних значений напряжений комплектов вентилей, может быть записано в другом виде. Если учесть, что для инверторного режима $\beta = 180^\circ - \alpha$, получаем $\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$, где α_1 и α_2 — углы управления первого и второго комплектов вентилей, отсчитываемые от точки естественного отпирания.

В случае, когда управляющие импульсы подаются одновременно на вентили обоих комплектов, а углы управления соответствуют приведенным выше равенствам, управление называют согласованным.

Внешние характеристики выпрямительного и инверторного комплектов при указанных соотношениях между углами управления являются продолжением одна другой (рис. 32.34).

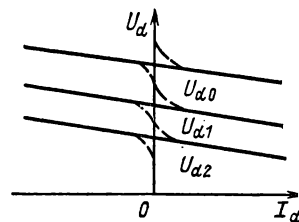


Рис. 32.34. Внешняя характеристика реверсивного преобразователя

Для обеспечения такой связи между углами α_1 и α_2 необходимо, чтобы характеристики вход — выход систем импульсно-фазового управления (СИФУ) обоими комплектами вентиля, т. е. зависимости между изменением фазы их выходных импульсов и сигналом управления $\alpha = f(U_{ур})$, было зеркально подобными.

Частным случаем симметричной фазовой характеристики СИФУ является линейная зависимость между изменением фазы управляющих импульсов системы и сигналом управления. Однако чаще используются системы управления с арккосинусоидальной характеристикой $\alpha = K \arccos(I_{ур})$, при которой результирующая регулировочная характеристика преобразователя $U_d = f(U_{ур})$ получается линейной, что позволяет иметь постоянный коэффициент усиления во всем диапазоне регулирования.

Уравнительный ток

Как уже было отмечено выше, в схемах реверсивных преобразователей с двумя комплектами вентиля имеется замкнутый контур, по которому под действием разности мгновенных значений напряжений комплектов вентиля, минуя цепь нагрузки, протекает ток, называемый уравнительным (см. рис. 32.30 и 32.32). Уравнительный ток вызывает дополнительные потери в вентилях и обмотках трансформатора, а в переходных режимах может приводить к аварийным отключениям защиты.

В общем случае уравнительный ток в реверсивном контуре определяется дифференциальным уравнением

$$L_{ур} \frac{di_{ур}}{dt} + R_{ур} i_{ур} = u_{d\alpha} + u_{d\beta} = u_{ур},$$

где $i_{ур}$ — мгновенное значение уравнительного тока; $L_{ур}$ — полная индуктивность реверсивного контура; R — полное активное сопротивление реверсивного контура; $u_{d\alpha}$, $u_{d\beta}$ — мгновенные значения напряжения первого и второго комплектов реверсивного преобразователя.

Поскольку активное сопротивление контура гораздо меньше индуктивного, то им можно пренебречь. Тогда

$$i_{ур} \approx \frac{1}{L_{ур}} \int_0^t u_{ур} dt.$$

В этом случае среднее значение уравнительного тока в статическом режиме, которое можно назвать статическим уравнительным током, равно

$$\begin{aligned} I_{ст} &= \frac{1}{T_{ур}} \int_0^{T_{ур}} i_{ур} dt = \\ &= \frac{1}{T_{тр}} \int_0^{T_{ур}} \left[\frac{1}{L_{ур}} \int_0^t u_{ур} dt \right] dt. \end{aligned}$$

При согласованном управлении статический уравнительный ток имеет начально-непрерывный характер. Вследствие этого уравнитель-

ный ток можно ограничить с помощью реакторов $OP1$ и $OP2$, включаемых последовательно с вентильными комплектами и увеличивающих $L_{ур}$. Чем выше индуктивность ограничивающих реакторов, тем меньше мгновенные и средние значения уравнительного тока. Если бы уравнительный ток периодически не достигал нуля, т. е. был непрерывным, то его нельзя было бы ограничить индуктивностью. Режим с непрерывным уравнительным током может иметь место в случае, когда среднее напряжение выпрямителя $U_{d\alpha}$ больше, чем средняя противо-ЭДС инвертора $U_{d\beta}$, т. е. в реверсивном контуре появляется неуравновешенное постоянное напряжение, направленное согласно с проводимостью вентиля. Такой режим может получиться в случае уменьшения суммы углов регулирования, когда $\alpha_1 + \alpha_2 < 180^\circ$. Это влечет за собой появление значительных уравнительных токов, которые не могут быть ограничены индуктивностью реакторов. Увеличение суммы углов регулирования ($\alpha_1 + \alpha_2 > 180^\circ$) приводит к уменьшению статического уравнительного тока, однако при этом преобразователь приобретает ряд недостатков, обусловленных нелинейностью результирующей внешней характеристики (пауза при переходе тока нагрузки через нуль, ухудшение динамических показателей и др.).

Выражение для средних и амплитудных значений статического уравнительного тока записывается в виде

$$I_{ст} = K_{ст} U_m / \omega L;$$

$$I_{стmax} = K_{ст max} U_m / \omega L,$$

где $K_{ст}$ и $K_{ст max}$ — коэффициенты, зависящие от схемы вентильных преобразователей и угла регулирования α . Значения коэффициентов $K_{ст}$ и $K_{ст max}$ для различных схем вентильных преобразователей как при индуктивной нагрузке, так и при работе на противо-ЭДС (якорь двигателя) приведены в [32.20].

Кроме статического, в переходных режимах работы преобразователя появляется динамический уравнительный ток. Его появление обусловлено тем, что в переходных режимах напряжения выпрямителя и инвертора не согласуются между собой $U_{d\alpha} > |U_{d\beta}|$ и в контуре, образованном двумя вентильными комплектами, появляется постоянная составляющая уравнительного напряжения, направленная согласно с проводимостью вентиля. Динамическая составляющая уравнительного тока при пренебрежении активными потерями в контуре записывается в виде

$$I_{дин} = \frac{1}{L_{ур}} \int_0^\infty u_{ур,дин} dt.$$

Она может во много раз превышать статический уравнительный ток. Если при этом ограничивающие реакторы насыщаются, уравнительный ток достигает особенно больших аварийных значений.

На рис. 32.35 показан процесс реверса в шестифазной схеме. В момент $t=0$ скачком изменяются углы α и β , а вентильная группа, работавшая в инверторном режиме, переходит в выпрямительный мгновенно (рис. 32.35, а),

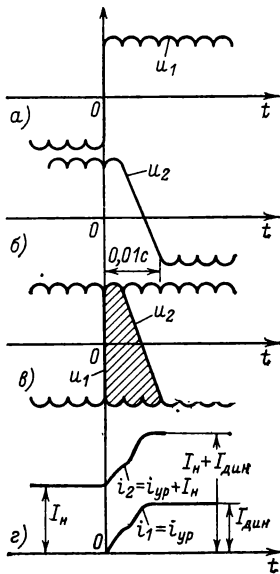


Рис. 32.35. Процесс реверса в вентильном преобразователе:

a — переход из инверторного режима в выпрямительный; *б* — переход из выпрямительного режима в инверторный; *в* — совмещенная диаграмма напряжений; *г* — токи в цепях преобразователя

тогда как у другой группы, работавшей в выпрямительном режиме, выходное напряжение может изменяться лишь по синусоиде напряжения того вентиля, который проводит ток в момент подачи команды на реверс (рис. 32.35, б). Совмещая оба процесса (рис. 32.35, в), можно видеть несоответствие напряжений двух комплектов преобразователя в переходном режиме, что вызывает толчок динамического уравнильного тока (рис. 32.35, г). При этом наибольший ток наблюдается, когда команда на реверс дана в момент отпирания очередного вентиля. В этих случаях динамический ток превосходит статический во много раз. Спустя определенный интервал времени уравнильный ток спадает. Время спада тока зависит от постоянной времени уравнильного контура.

На рис. 32.35 показан процесс реверса в вентильном преобразователе, управляемом безынерциальной системой. Разность напряжений u_2 и u_1 вызывает толчок динамического уравнильного тока, а напряжение на нагрузке u_n , равное среднему значению напряжений групп u_1 и u_2 , реверсируется за 0,01 с. Если при подаче команды на реверс задержать на 0,01 с перевод инверторного комплекта в выпрямительный режим, то динамического уравнильного тока не будет, а реверс напряжения на нагрузке осуществится за то же время, равное 0,01 с.

Того же эффекта ликвидации динамического уравнильного тока при сохранении предельного быстродействия вентильного преобразователя можно добиться плавным изменением полярности напряжений групп вентиля, для чего на вход системы управления включается инерционное звено с постоянной времени

0,006—0,008 с. При этом переход инверторного комплекта вентилей в выпрямительный режим замедляется, тогда как напряжение группы, переходящей из выпрямительного режима в инверторный, по-прежнему изменяется по синусоиде анодного напряжения последнего проводившего ток вентиля.

Обе разновидности этого метода, избавляющего от динамического уравнильного тока при сохранении предельного быстродействия вентильного преобразователя, позволяют выбирать ограничительные реакторы из условий ограничения только статического уравнильного тока. При этом сохраняются оптимальные внешняя и регулировочная характеристики вентильного преобразователя.

Раздельное управление вентильными комплектами

Рассмотренный выше способ позволяет ограничить лишь динамический уравнильный ток. Полное устранение уравнильного тока может быть получено при раздельном управлении, которое заключается в снятии управляющих импульсов с вентилей того комплекта, который в данный момент не проводит тока. В этом случае один из комплектов вентилей всегда заперт и контур для протекания уравнильного тока отсутствует. Благодаря этому можно исключить из схемы ограничивающие реакторы и полностью использовать установленную мощность преобразователя, так как выпрямительный комплект можно открывать с нулевым углом управления. Система управления преобразователем при этом, однако, усложняется, так как приходится вводить в систему датчики токов комплектов вентилей либо датчик тока нагрузки ДТ (рис. 32.36), которые при спаде тока через работающую группу либо тока определенного направления в нагрузке до достаточно малого значения вырабатывают команды, подаваемые на логическое устройство ЛУ для снятия управляющих импульсов с системы управления СУ данного комплекта и на подачу импульсов на другой комплект с задержкой, превышающей время восстановления вентилей. Углы управления вышедшего из работы и вновь вступившего в работу комплекта должны соответствовать равенству согласованного управления $\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$, чтобы непрерывность результирующей регулировочной характеристики не нарушалась. В то же время одновременная работа вентильных комплектов должна быть надежно исключена даже в течение коротких интервалов, поскольку при отсутствии ограничивающих реакторов броски уравниль-

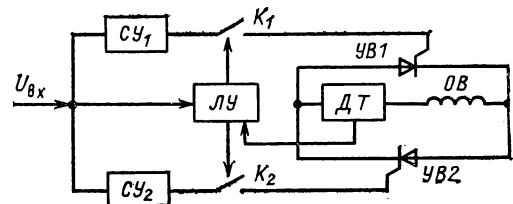


Рис. 32.36. Структурная схема системы управления преобразователем, питающим обмотку возбуждения

ного тока могут быть весьма значительными.

Логическое переключающее устройство может быть двухпозиционным (когда управляющие импульсы подаются на один из вентиляльных комплектов, за исключением паузы) либо трехпозиционным с зоной нечувствительности, в которой импульсы не подаются ни на одну из групп. В трехпозиционной системе во время паузы система регулирования оказывается разомкнутой, что в ряде случаев недопустимо.

Когда преобразователь питает пассивную цепь (обмотка возбуждения какой-либо машины, обмотка электромагнита), система управления относительно простая (рис. 32.36). Переключение комплектов происходит в функции знака сигнала управления, а логическое устройство не разрешает произвести переключение до тех пор, пока не уменьшится ток нагрузки. При питании якорной цепи требуется более сложная система управления (рис. 32.37), так как рекуперативный режим возможен в этом случае при сохранении знака управляющего сигнала (подтормаживание двигателя). Поэтому для создания сигнала, воздействующего на переключение комплектов, необходимо включить вентильный преобразователь в замкнутую систему регулирования. При этом ширина зоны нечувствительности, при которой не будут происходить переключения, находится в обратной зависимости от коэффициента усиления системы регулирования. Необходимость такой обратной связи лишает преобразователь той автономности, которой обладает реверсивный преобразователь с согласованным управлением.

От этого недостатка свободна схема со сканирующей логикой (рис. 32.38), в которой ЛУ не связано с сигналом управления и находится постоянно в колебательном режиме (при отсутствии запрета со стороны датчика тока). Благодаря этому происходит постоянное переключение комплектов до тех пор, пока не появится ток в одном из них под воздействием сигнала управления. Схема осуществляет автоматический поиск нужного комплекта.

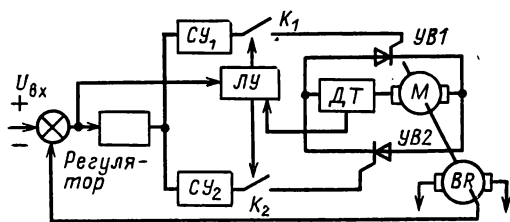


Рис. 32.37. Структурная схема системы управления преобразователем, питающим якорную цепь

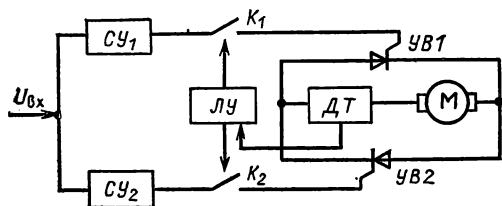


Рис. 32.38. Структурная схема системы управления преобразователем со сканирующей логикой

32.17. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ С НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ СВЯЗЬЮ

Для преобразования переменного напряжения одной частоты f_1 в переменное напряжение другой, более низкой частоты $f_2 < f_1$, используются либо системы выпрямитель-инвертор с промежуточным звеном постоянного тока, либо преобразователи частоты с непосредственной связью (ПЧНС) с естественной коммутацией тока вентилей. Преобразователи этого типа позволяют осуществить регулирование как выходного напряжения от 0 до U_{2max} , так и частоты f_2 от 0 до примерно $0,5f_1$. При этом регулирование напряжения и частоты может осуществляться независимо. Часто число фаз на входе ПЧНС m_1 и на его выходе m_2 может быть неодинаково ($m_1 > m_2$). ПЧНС широко используются для питания низкочастотных регулируемых электроприводов (шахтные подъемники, шаровые мельницы цементных заводов, механические ножницы и др.). Кроме того, ПЧНС применяют для питания обмоток электромагнитов ускорителей, в установках для перемешивания жидкого металла и т. п.

ПЧНС строятся по схемам, идентичным схемам реверсивного преобразователя. Схемы на рис. 32.30 при периодическом изменении углов управления могут быть примером трехфазно-однофазных ПЧНС ($m_1=3$; $m_2=1$). Наличие двух вентильных комплектов позволяет получить на нагрузке напряжение изменяющейся полярности при токе, который может изменять свое направление.

Так как среднее значение напряжения на выходе каждого комплекта зависит от угла регулирования α :

$$U_2 = E_{d0} \cos \alpha(t),$$

где $\alpha(t)$ — определенная функция времени, то для получения на выходе ПЧНС синусоидально изменяющегося напряжения с амплитудой E_{d0} и частотой $\omega_2 = 2\pi f_2$ (без учета высокочастотных пульсаций)

$$U_2 = E_{d0} \sin(\omega_2 t)$$

необходимо изменять углы регулирования α_1 и α_2 первого и второго комплектов вентилей по арккосинусоидальному закону

$$\alpha_1 = \arccos(v \sin \omega_2 t);$$

$$\alpha_2 = \arccos(-v \sin \omega_2 t),$$

где $v = U_2/E_{d0}$ — степень управления по амплитуде выходного напряжения U_2 .

При $v=1$ имеет место максимальная амплитуда выходного напряжения ПЧНС. В этом частном случае углы регулирования α_1 и α_2 должны изменяться во времени по линейному закону (рис. 32.39, з).

Для получения положительной полуволны выходного напряжения U_2 при чисто активной нагрузке необходимо изменить угол α_1 от $\pi/2$ до 0 и затем от 0 до $\pi/2$. Отрицательная полуволна формируется при работе второго комплекта, у которого угол α_2 изменяется аналогично от $\pi/2$ до 0 и затем от 0 до $\pi/2$.

На рис. 32.39 приведены временные диаграммы, поясняющие работу ПЧНС с однофазным выходом ($m=1$) при выполнении каждого комплекта преобразователя по шестифазной ($m=6$) схеме (например, по трехфазной мо-

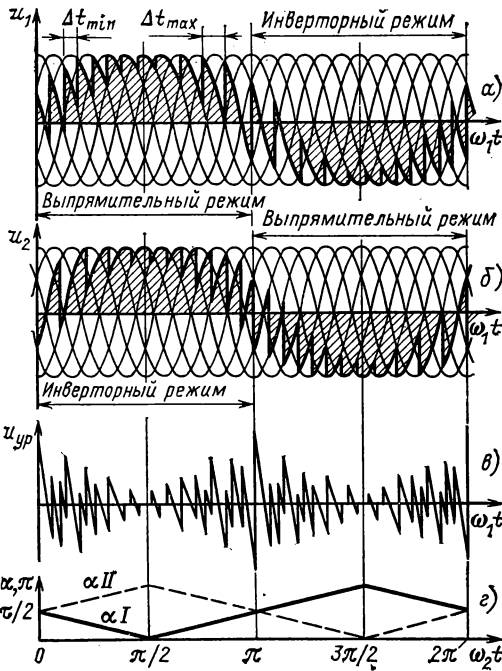


Рис. 32.39. Временные диаграммы напряжений и токов (а–е), а также изменение углов регулирования α_1 и α_2 во времени (з) в трехфазно-однофазном ПЧНС

стовой) для $N = \omega_1/\omega_2 = 4$. Из-за того, что коммутация тока и восстановление запирающих свойств тиристоров происходят не мгновенно, приходится ограничивать максимальные углы открытия вентилей значениями, существенно меньшими π .

При работе ПЧНС углы α_1 , α_2 изменяются не плавно (как показано на рис. 32.40), а дискретно в соответствии с дискретным характером работы отдельных вентилей. При этом возможные значения углов α_1 и α_2 лежат на кривых, приведенных на рис. 32.40.

Как и в реверсивных преобразователях, в ПЧНС возможно как раздельное, так и согласо-

ванное управление вентильными комплектами. При согласованном управлении из-за того, что $\alpha_{\max} < \pi$, приходится ограничивать и минимальные значения углов α , т. е. практически $\alpha_{\min} > 0$.

При согласованном управлении вентильными комплектами в ПЧНС из-за разности мгновенных значений напряжения на выходе вентильного комплекта, работающего в выпрямительном режиме, и внутренней противо-ЭДС комплекта, работающего в инверторном режиме, возникает уравнивающее напряжение $u_{ур}$ (см. рис. 32.39, в) и протекает уравнивательный ток. Для его ограничения в цепь каждого вентильного комплекта включаются ограничивающие реакторы, а также используется раздельное управление вентильными комплектами.

Так как в рассматриваемых преобразователях происходит однократное преобразование электрической энергии, то такие преобразователи имеют более высокий КПД, чем преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока. К достоинствам ПЧНС относится также возможность двустороннего обмена энергией между сетью и нагрузкой, что осуществляется за счет возможности работы вентильных комплектов в выпрямительном и инверторном режимах.

ПЧНС с трехфазным выходом ($m=3$) образуют из трех однофазных преобразователей. На рис. 32.41, а приведена схема такого преобразователя, питающегося от трехфазной сети переменного тока. Каждый преобразователь, входящий в состав многофазного ПЧНС, выполнен по трехфазной нулевой схеме ($m_1=3$) с встречно-параллельным включением вентильных комплектов. Для уменьшения влияния процессов коммутации тока на питающую сеть, а также для согласования напряжений сети и нагрузки используется разделительный трансформатор (показан пунктиром).

В преобразователях большой мощности обычно используются мостовые трехфазные схемы ($m_1=6$), которые могут выполняться как в бестрансформаторном варианте при электрически разделенных фазах нагрузки (рис. 32.41, б), так и с трансформатором, когда три фазы нагрузки могут быть соединены в звезду или треугольник.

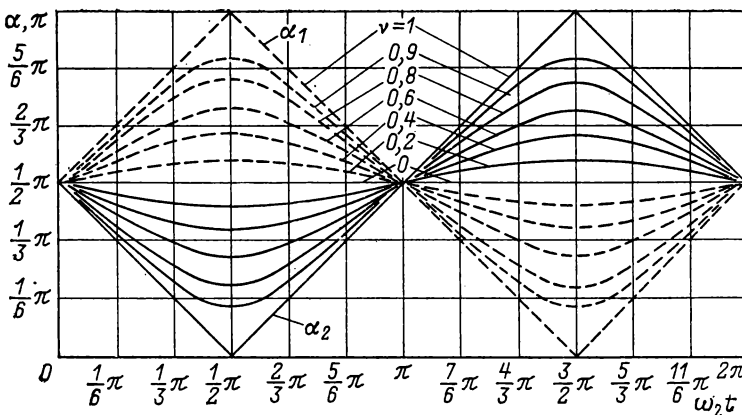


Рис. 32.40. Зависимости углов управления α_1 и α_2 от времени

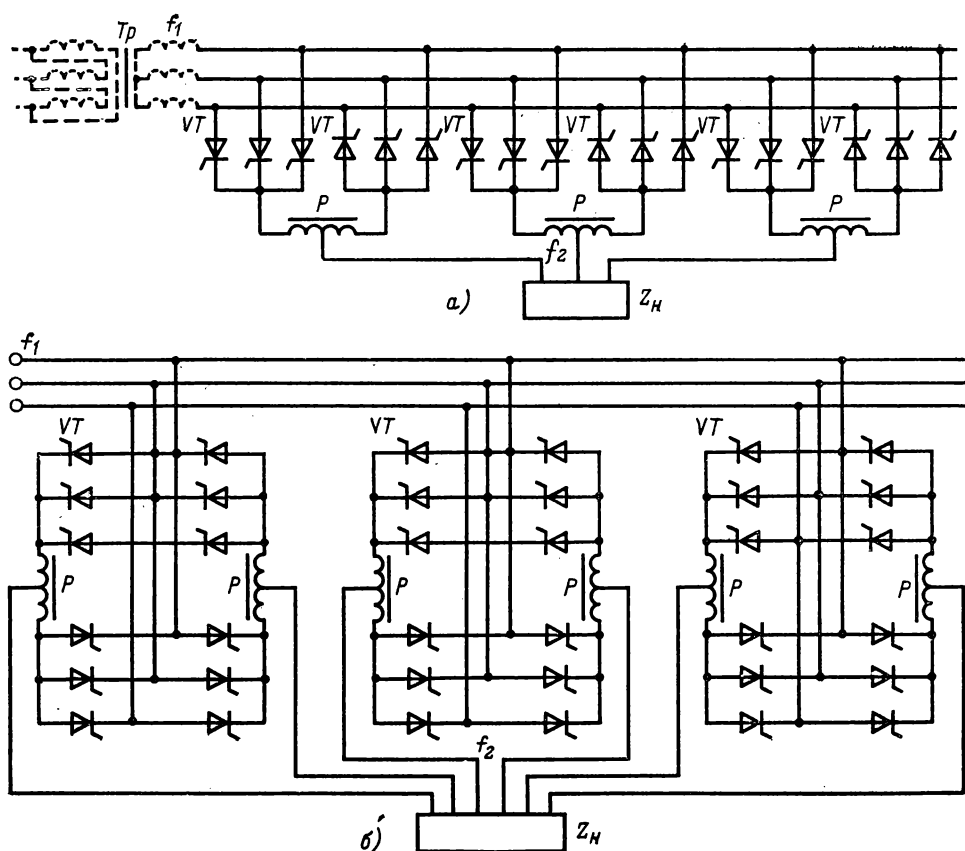


Рис. 32.41. Трехфазно-трехфазные преобразователи частоты с непосредственной связью:
а — на базе нулевой схемы; б — на базе трехфазной мостовой схемы

32.18. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Наиболее распространенными являются *многоканальные синхронные системы управления* (МСУ), построенные по вертикальному принципу. Особенностью МСУ является то, что формирование и фазовый сдвиг импульсов осуществляются в отдельном канале для каждого вентильного плеча многофазного преобразователя, каждый канал, как правило, содержит последовательно включенные сетевой фильтр, генератор развертки, синхронизированный с сетью, пороговое устройство, выходной формирователь.

Пороговое устройство сравнивает напряжение развертки с управляющим напряжением $U_{упр}$ и при их равенстве выдает импульс на выходной формирователь. В качестве генератора развертки используют генератор линейно изменяющегося напряжения или синусоидальное напряжение сети. В последнем случае при соответствующей фазировке напряжения развертки относительно моментов естественной коммутации тиристоров результирующая регулировочная характеристика преобразователя получается линейной $U_d = f(U_{упр}) = KU_{упр}$.

Достоинством МСУ является простота структурной схемы.

Основной недостаток — необходимость подстройки каналов с целью их симметрирования. Асимметрия импульсов по каналам на практике составляет $\Delta\alpha = 2 \div 3^\circ$. Недостатком также являются повышенные аппаратные затраты, увеличивающиеся пропорционально числу каналов.

С развитием средств интегральной схемотехники все большее применение находят *одноканальные синхронные системы управления*. Рассмотрим сначала систему с сокращенным числом каналов, в которой импульсы для двух противофазных вентильных плеч сдвигаются в одном канале. Число каналов таких систем равно $m/2$ (m — число фаз преобразователя, которое предполагается четным, но при этом в каждом канале необходимы дополнительные логические схемы). При современном развитии средств микроэлектроники это не является большим усложнением. В такой системе по-прежнему необходимы настроечные элементы, хотя их число и снижается в 2 раза (по сравнению с m -канальными системами).

Схема одного канала (для управления двумя противофазными тиристорами) показана на рис. 32.42. Сетевой фильтр Φ сглаживает импульсные помехи в напряжении сети. По-

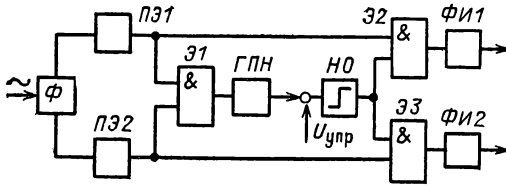


Рис. 32.42. Структурная схема одноканальной системы управления двумя противофазными тиристорами

роговые элементы $ПЭ1$ и $ПЭ2$ формируют из синусоидального напряжения два ступенчатых напряжения, имеющих взаимный фазовый сдвиг на $180^\circ - \delta$ ($\delta \approx 3 \div 5$). Благодаря такому сдвигу на выходе логической схемы $Э1$ имеет место совпадение сигналов длительностью $\tau = \delta / \omega_c$ (ω_c — частота сети). На выходе $Э1$, таким образом, формируются короткие синхронизирующие импульсы, запускающие (синхронизирующие) генератор пилообразного напряжения ГПН. На входе нуля-органа $НО$ (пороговый элемент) происходит сравнение напряжения пилообразной развертки и напряжения управления $U_{упр}$. С выхода $НО$ импульсы поступают на вход логических схем $Э2$ и $Э3$, на другие входы которых поданы сигналы с выходов пороговых элементов $ПЭ1$ и $ПЭ2$.

Формирование импульсов происходит на выходе той логической схемы, на выходе которой в данный момент времени имеет место совпадение сигналов. Таким образом, происходит распределение импульсов на противофазные тиристоры. Формирователи $ФИ1$ и $ФИ2$ предназначены для формирования и усиления выходных импульсов. Для управления шестифазным мостовым преобразователем применяют три идентичных канала. Такие формирователи-усилители в настоящее время наиболее перспективны среди многоканальных систем.

В подобных системах управления преобразователями все шире используются серийно выпускаемые интегральные микросхемы общего назначения. Ведутся также работы по созданию специальных микросхем, реализующих отдельные узлы или полный канал системы управления в одном корпусе.

Синхронные одноканальные системы управления, в которых импульсы для всех вентильных плеч сдвигаются в одном общем канале, имеют высокую фазовую симметрию импульсов. Структурная схема такой системы показана на рис. 32.43.

Устройство синхронизации $УС$ формирует из многофазного напряжения сети импульсы частотой $m f_c$, которые сдвигаются фазосдвигающими элементами $ФЭ1$ — $ФЭ3$. Далее импульсы распределяются по каналам с помощью

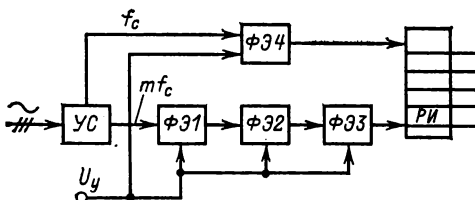


Рис. 32.43. Структурная схема синхронной одноканальной системы управления

распределителя импульсов $РИ$. Применяют $РИ$ автономного типа (кольцевые пересчетные схемы, регистры сдвига) и зависимые, выполненные в виде модели силовой части преобразователя. На рис. 32.43 показана система с автономным $РИ$, для которого необходим дополнительный канал синхронизации, осуществляющий формирование и фазовый сдвиг ($ФЭ4$) импульсов для приоритетной ячейки $РИ$.

Наличие отдельного канала для синхронизации $РИ$, достаточно сложного устройства синхронизации $УС$ и, наконец наличие нескольких фазосдвигающих элементов, число которых возрастает с ростом фазности преобразователя ($n=6 \div 7$ при $m=12$), ограничивают применение таких систем управления.

В последние годы получили развитие *асинхронные системы управления*. Особенностью асинхронных систем управления является то, что формирование импульсов осуществляется автономным управляемым генератором, а синхронизация с сетевым напряжением и фазовый сдвиг этих импульсов происходят за счет обратной связи по выходному параметру преобразователя. Таким образом, асинхронные системы управления функционируют только в замкнутой системе регулирования. Структурная схема асинхронной одноканальной системы управления приведена на рис. 32.44. Управляемый

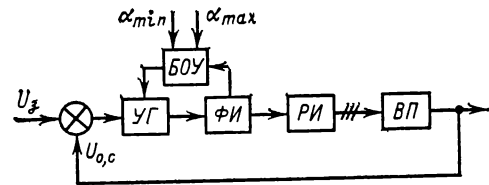


Рис. 32.44. Структурная схема асинхронной системы управления

генератор $УГ$ в установившемся режиме, когда $U_z = U_{o,c}$ (где U_z — сигнал задания, $U_{o,c}$ — сигнал обратной связи), вырабатывает импульсы частотой $f_r = m f_c$, которые через формирователь $ФИ$ и распределитель импульсов $РИ$ поступают в циклическом порядке на вентили преобразователя $ВП$. При изменении сигнала задания U_z или отклонении выходного параметра преобразователя на входе $УГ$ возникает сигнал рассогласования, который, воздействуя на генератор, увеличивает или уменьшает частоту импульсов, что приводит к приращению фазы импульсов и переходу системы в новое состояние равновесия, при котором $U_z = U_{o,c}$.

Асинхронные одноканальные системы управления нашли применение в преобразователях с высокими требованиями к фазовой симметрии управляющих импульсов, что обеспечивает хороший гармонический состав выходного напряжения (тока).

Отсутствие непосредственной связи через устройство синхронизации с сетью позволяет асинхронным одноканальным системам управления устойчиво работать при значительных искажениях напряжения сети. Такие искажения особенно велики при соизмеримых мощностях сети и преобразователя, например, в линиях передачи постоянного тока. Применение в вентильных электроприводах асинхронных систем

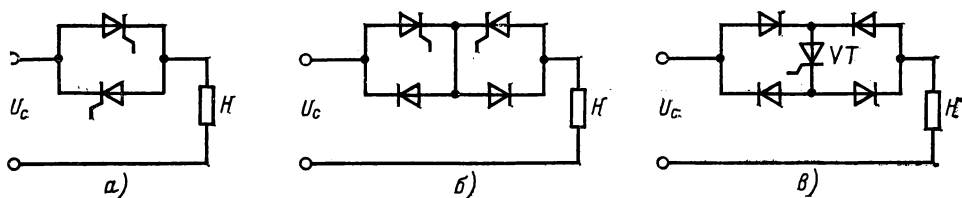


Рис. 32.45. Схемы преобразователей переменного напряжения:

а — встречно-параллельное включение; *б* — встречное включение тиристоров и диодов; *в* — мостовая схема с тиристором в диагонали

ограничивает их инерционность. Однако соответствующим построением управляемого генератора можно достигнуть существенного увеличения быстродействия. Так как при этом интегральная составляющая все же остается, то результирующая передаточная функция соответствует пропорционально-интегральному звену. Поэтому такие асинхронные системы управления имеют перспективы в электроприводах в качестве системы управления преобразователем и в качестве ПИ-регулятора одновременно.

32.19. РЕГУЛИРУЕМЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ

На рис. 32.45 приведены схемы однофазных преобразователей переменного напряжения. В схеме рис. 32.45, *а* применяется встречно-параллельное включение тиристоров; вместо двух тиристов можно использовать один симметричный тиристор. В схеме рис. 32.45, *б* использовано встречно-параллельное включение тиристоров и диодов, причем оба тиристора имеют эквивалентные катоды. На рис. 32.45, *в* приведена схема с использованием всего лишь одного тиристора, включенного в диагональ мостового моста. Особенностью двух последних схем является нулевое обратное напряжение на тиристоре. Потери мощности в схеме рис. 32.45, *в* больше, чем в схеме рис. 32.45, *б*, а в последней больше, чем в схеме рис. 32.45, *а*. Максимальное прямое напряжение на тиристорах во всех трех схемах и максимальное обратное напряжение в схеме рис. 32.45, *а* равно $\sqrt{2}U_c$, в двух последних схемах обратное напряжение на тиристоре равно нулю.

Наибольшее распространение имеет схема рис. 32.45, *а*, которая рассматривается ниже более подробно.

При активной нагрузке ток и напряжение совпадают по форме (рис. 32.46, *а*). Угол управления α может изменяться в пределах от 0 до π .

Методика расчета схемы при активной нагрузке приведена в [32.1, 32.18].

Действующее значение тока тиристора

$$I_{T,д} = I_{до} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)},$$

где $I_{до} = U_c/R$ — действующее значение тока нагрузки при $\alpha=0$,

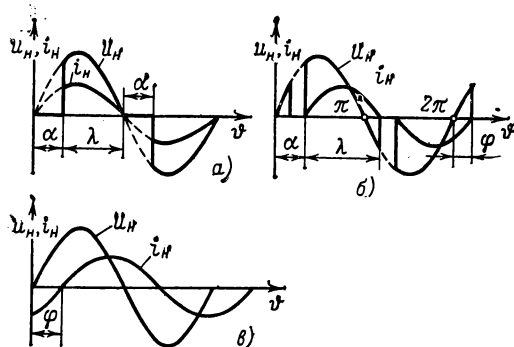


Рис. 32.46. Временные диаграммы напряжений и токов в преобразователе переменного напряжения

Среднее значение тока тиристора

$$I_T = \frac{I_{до}}{\sqrt{2}} \frac{1 + \cos \alpha}{\pi}.$$

Коэффициент формы кривой тока тиристора

$$K_{ф,т} = \frac{I_{T,д}}{I_T} = \frac{\sqrt{\pi \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}}{1 + \cos \alpha}.$$

Активная мощность, потребляемая от сети, $P_a = P \chi^2$,

где $P = U_c^2/R$ — мощность, потребляемая от сети при $\alpha=0$; $\chi = v \cos \varphi_{(1)}$ — коэффициент мощности; $\cos \varphi_{(1)}$ — косинус угла сдвига первой гармоники входного тока относительно напряжения; v — коэффициент искажения тока:

$$\cos \varphi_{(1)} = \frac{U_*^2}{\sqrt{\frac{\sin^2 2\alpha}{\pi^2} + U_*^4}};$$

$$v = \frac{\sqrt{\frac{\sin^2 \alpha}{\pi^2} + U_*^4}}{U_*},$$

где U_* — относительное действующее напряжение на нагрузку:

$$U_* = \frac{U_{н,д\alpha}}{U_{н,до}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(1 - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}.$$

Реактивная мощность, определяемая сдвигом по фазе первой гармоники тока,

$$Q = P \sin^2 \alpha / \pi.$$

Мощность искажения, обусловленная токами высших гармоник,

$$Q_{\text{иск}} = \frac{P}{\pi} \sqrt{\pi \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) - \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)^2 - \sin^4 \alpha}.$$

Если нагрузка преобразователя имеет активно-индуктивный характер, то форма тока в цепи не повторяет форму напряжения (рис. 32.46, б), так как в индуктивности возникает ЭДС самоиндукции, которая препятствует нарастанию и спаду тока. Наличие самоиндукции приводит к тому, что ток через тиристор протекает в течение некоторого времени после изменения знака питающего напряжения.

Активно-индуктивную нагрузку можно охарактеризовать фазовым углом $\varphi = \arctg \omega L_H / R_H$. При $\alpha > \varphi_{кр}$ ток в нагрузке прерывистый (рис. 32.46, б); если угол управления $\alpha < \varphi_{кр} = \varphi$, то появление тока в одном тиристоре совпадает с исчезновением тока в другом тиристоре и ток в нагрузке непрерывный и синусоидальный, сдвиг между током и напряжением равен φ (рис. 32.46, в), т.е. при $\alpha < \varphi_{кр}$ возможность регулирования тока в схеме отсутствует. Однако при этом длительность управляющих импульсов должна быть больше угла сдвига фаз φ . Если это условие не выполняется, то один из тиристоров не включается и схема работает в режиме однополупериодного выпрямителя.

Закон изменения тока в схемах преобразователей переменного напряжения при RL -нагрузке определяется уравнением

$$i = \frac{\sqrt{2} U_c}{Z_H} [\sin(\vartheta - \varphi) - e^{\alpha - \vartheta / \omega \tau_H} \sin(\alpha - \varphi)],$$

$$\text{где } Z_H = \sqrt{(\omega L_H)^2 + R_H^2};$$

$$\tau_H = L_H / R_H.$$

Угол проводимости тиристоров λ может быть найден из уравнения

$$\sin(\lambda + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) e^{-\lambda / \omega \tau_H}.$$

Трехфазные преобразователи переменного напряжения выполняются на основе однофазных схем (рис. 32.47).

Режим работы схемы (рис. 32.47, а) существенно зависит от наличия нулевого провода. В схеме с нулевым проводом токи через тиристоры во всех фазах независимы друг от друга и режимы работы характеризуются уравнениями, приведенными для однофазной схемы.

В схеме рис. 32.47, а без нулевого провода работа всех фаз взаимосвязана и для протекания тока нагрузки необходимо открытое состояние тиристоров одновременно в двух либо трех фазах. В этом варианте тиристоры защищены от сверхтоков короткого замыкания при замыкании нагрузки в одной из фаз.

На рис. 32.47, б приведена схема с тремя тиристорами и тремя диодами. При активной нагрузке для регулирования тока нагрузки от максимума до нуля фаза управляющих импульсов должна изменяться в диапазоне от 0 до 210° . При активно-индуктивной нагрузке этот диапазон уменьшается.

Схема рис. 32.47, в содержит три тиристора. Полный диапазон изменения фазы управляющего напряжения, как и в схеме рис. 32.47, б, от 0 до 210° (при активной нагрузке).

32.20. СПОСОБЫ ВЫКЛЮЧЕНИЯ ВЕНТИЛЕЙ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

Наряду с диодами и незапираемыми или, иначе, однооперационными тиристорами (которые с помощью управляющего электрода могут быть открыты в нужный момент времени, но не могут быть заперты) в преобразовательных установках в последнее время все шире применяются запираемые (двуоперационные) тиристоры и силовые транзисторы, используемые в ключевом режиме. В соответствии с этим все возможные способы выключения силовых вентилей могут быть сведены к трем случаям:

1. Коммутация, т.е. выключение вентилей (диола, тиристора, транзистора) за счет включения какого-либо другого прибора и образования при этом контура, содержащего наряду с другими элементами (индуктивности, активные сопротивления) источник напряжения (или тока) с такой полярностью, что ток в рассматриваемом вентиле спадает к нулю. Таким образом, под коммутацией в преобразовательной технике понимают процесс перехода тока

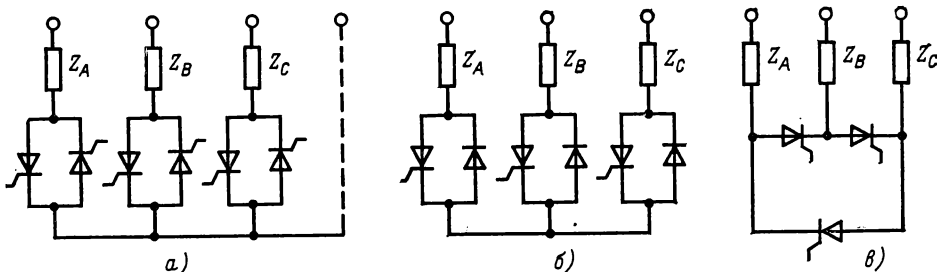


Рис. 32.47. Принципиальные схемы трехфазных преобразователей переменного напряжения

с одного вентиля на другой (или с одного вентильного плеча на другое), причем в течение определенного интервала времени, которое в пределе при мгновенной коммутации стремится к нулю, ток проходит через оба вентиля одновременно. Если коммутирующее напряжение, обуславливающее спад тока через вентиль к нулю, есть напряжение сети переменного тока, вводимое в контур коммутации непосредственно или через трансформатор, коммутацию называют естественной, а преобразователи считают ведомыми сетью (или зависимыми). Сюда относятся все выпрямители, рассмотренные в § 32.11, инверторы, а также преобразователи, рассмотренные в § 32.18 и 32.20. Если источником коммутирующего напряжения является специально введенный вспомогательный источник постоянного (или реже переменного) напряжения, не связанный непосредственно с сетью, коммутацию называют принудительной или искусственной. Чаше всего в качестве такого вспомогательного источника используется предварительно заряженный конденсатор, тогда говорят о принудительной конденсаторной коммутации. Принудительная коммутация может быть прямой (или одноступенчатой), если имеет место переход тока с основного вентиля (вентильного плеча) на другой основной вентиль (плечо) преобразователя, или непрямой (или двухступенчатой), если ток в результате коммутации сначала переходит с основного вентиля (плеча) на вспомогательный (коммутирующий), который специально предусмотрен для обеспечения запираания основного, а затем со вспомогательного вентиля на следующий основной вентиль (плечо) преобразователя.

2. Запирание (выключение) вентиля по управляющему электроду. Этот случай имеет место при использовании запираемых (двух-операционных) тиристоров, запирание которых происходит за счет отрицательного управляющего импульса, силовых биполярных транзисторов, для запираания которых достаточно прервать базовый ток (либо — для более быстрого запираания — желательнее подать на базу соответствующее напряжение или ток смещения), или силовых полевых (типа МДП) транзисторов, для запираания которых необходимо подать на затвор соответствующее напряжение смещения. При использовании подобных приборов, иногда называемых полностью управляемыми, также можно говорить о принудительной коммутации, так как ток, протекающий через прибор, необходимо при его запираании перевести на другой прибор, которым в импульсных преобразователях постоянного напряжения обычно является диод, шунтирующий нагрузку, или в автономных инверторах диод противофазного вентильного плеча.

3. Спад анодного тока вентиля к нулю без коммутации (т.е. без перевода тока на какой-либо другой, главный или вспомогательный, вентиль преобразователя). Такой спад тока к нулю может быть обусловлен либо наличием в цепи источника переменного напряжения (например, переменного напряжения сети при работе выпрямителя или ведомого сетью инвертора в режиме разрывного тока), либо колебательным характером самой цепи

(например, в автономных резонансных инверторах — см. § 32.28).

32.21. РЕГУЛИРУЕМЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПЯЖЕНИЯ С НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ СВЯЗЬЮ

Преобразование постоянного напряжения в постоянное с целью изменения его уровня, плавного регулирования или стабилизации напряжения (или тока) может осуществляться как с помощью преобразователей со звеном переменного тока (т.е. по системе автономный инвертор — трансформатор — выпрямитель), применяемых, когда отношение выходного и входного напряжения больше 10—20 или меньше 0,05—0,1, так и с помощью преобразователей с непосредственной связью. В последних используется один из импульсных методов регулирования напряжения:

1) широтно-импульсное регулирование (ШИР), при котором изменяется длительность (ширина) импульса t_n (или паузы между импульсами t_p), при неизменном периоде $T = t_n + t_p = 1/f$ частоты повторения импульсов f ;

2) частотно-импульсное регулирование (ЧИР), при котором изменяется частота повторения f_k при неизменной их длительности t_n (или паузе t_p);

3) время-импульсное регулирование (ВИР), называемое также релейным или позиционным регулированием, при котором ограничивается отклонение от заданной величины какого-либо параметра объекта, питающегося от преобразователя (например, ограничиваются пульсации тока в цепи активно-индуктивной нагрузки, скорости вращения электродвигателя, температуры в печи и т.д.), а частота и длительность импульсов непосредственно не контролируются и в процессе регулирования указанного параметра непрерывно изменяются.

Известны три основные схемы импульсных регулируемых преобразователей постоянного напряжения, отличающиеся способом соединения регулирующего ключевого прибора и других элементов относительно источника питания и нагрузки. Рассмотрим эти три схемы, часто называемые преобразователями I, II и III рода, предположив, что в качестве регулирующего ключа используется полностью управляемый прибор, т.е. транзистор или запираемый (двухоперационный) тиристор.

В преобразователе I рода (рис. 32.48,а) регулирующий ключевой прибор VT включен последовательно с источником питания E , накопительный реактор L последовательно с нагрузкой (либо используется индуктивность самой нагрузки, например двигателя, или входная индуктивность Г-образного фильтра), а шунтирующий диод VD — в параллельной цепи. На рис. 32.48,б показаны диаграммы напряжения u , приложенного к индуктивности L и нагрузке, тока в цепи нагрузки i_n , который предполагается непрерывным, и входного тока i_{ax} (т.е. тока прибора VT). На интервале t_n VT включен, ток i_n нарастает и в индуктивности L накапливается энергия. На интерва-

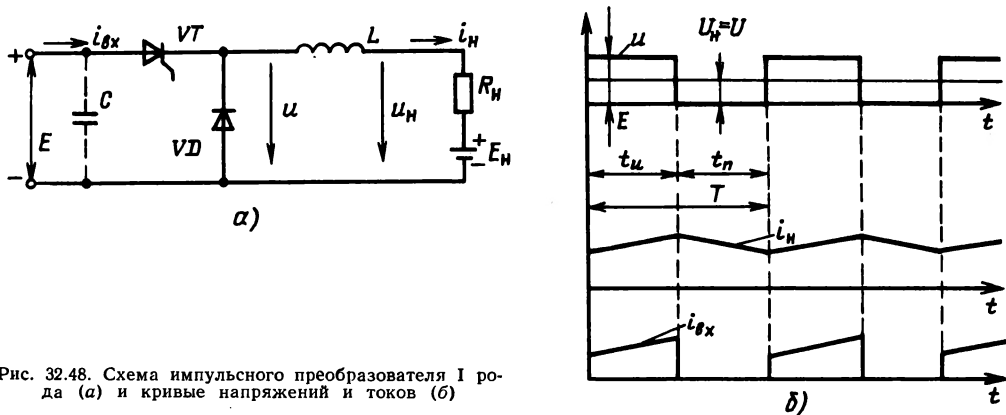


Рис. 32.48. Схема импульсного преобразователя I рода (а) и кривые напряжений и токов (б)

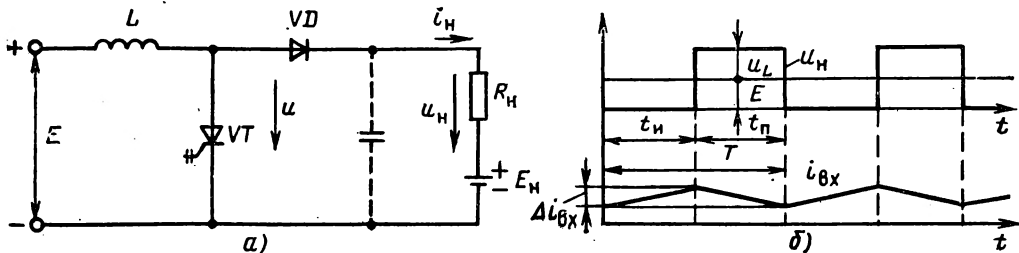


Рис. 32.49. Схема импульсного преобразователя II рода (а) и кривые напряжений и токов (б)

ле t_n VT заперт, открыт диод VD и часть энергии, накопленной в L , отдается в нагрузку. Среднее за период значение напряжения на нагрузке U_n , равное среднему значению напряжения U (если пренебречь падением напряжения на активном сопротивлении обмотки реактора), определяется как

$$U_n = \frac{t_n}{T} E = \gamma E,$$

где $\gamma = t_n/T$ — коэффициент регулирования, изменяющийся (теоретически) от 0 до 1.

Таким образом, преобразователь I рода позволяет регулировать напряжение вниз от напряжения источника питания.

В преобразователе II рода (рис. 32.49,а) накопительный реактор L включен в цепь источника питания, диод VD в цепь нагрузки, а регулирующий ключевой прибор VT — в параллельной цепи. На интервале t_n VT открыт и проводит ток, при этом ток $i_{\theta x}$ нарастает (рис. 32.49,б) и накопленная в L энергия увеличивается. При этом $E = L di_{\theta x}/dt$. Приняв, что ток в реакторе изменяется прямолинейно (что справедливо при достаточно малых его пульсациях), можно последнее соотношение переписать в виде

$$E \approx L \frac{\Delta i_{\theta x1}}{t_n}.$$

При запираании VT отпирается диод VD и к нагрузке прикладывается напряжение, равное сумме напряжения источника E и ЭДС

самоиндукции, наводимой на реакторе u_L при уменьшении тока $i_{\theta x} = i_n$,

$$u_n = E + L \frac{di_{\theta x}}{dt} \approx E + L \frac{\Delta i_{\theta x2}}{t_p}.$$

При установившемся режиме преобразователя изменение тока в сторону уменьшения на интервале паузы $\Delta i_{\theta x2}$ равно изменению тока в дросселе в сторону нарастания $\Delta i_{\theta x1}$ на интервале t_n . Тогда амплитуда импульса напряжения на нагрузке

$$U_n = E + E \frac{t_n}{t_p} = E \frac{T}{T - t_n} = E \frac{1}{1 - \gamma}.$$

Если на выходе преобразователя включен конденсатор C для сглаживания пульсаций напряжения (пунктир на рис. 32.49,а), то амплитуду импульса U_n можно приравнять к среднему значению выходного напряжения.

Таким образом, при изменении γ от 0 до 1 выходное напряжение преобразователя II рода изменяется вверх от напряжения питания E до ∞ (теоретически).

Схема преобразователя III рода показана на рис. 32.50,а. Ее особенностью является включение накопительного реактора L в параллельную цепь; при этом на интервале запертого состояния VT ток реактора замыкается в контуре нагрузки против часовой стрелки, в связи с чем выходное напряжение у такого преобразователя имеет полярность, обратную полярности входного. Приняв, как и ранее, что ток в реакторе на интервалах t_n

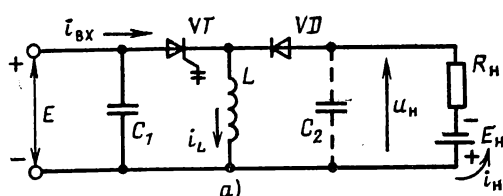


Рис. 32.50. Схема импульсного преобразователя III рода (а) и кривые напряжений и токов (б)

и t_n изменяется по линейному закону, имеем для интервала включенного состояния VT

$$E \approx L \frac{\Delta i_{L1}}{t_n},$$

а для интервала, когда VT заперт (без учета знака напряжения),

$$U_H = L \Delta i_{L2} / t_n.$$

Приравняв при установившемся режиме $\Delta i_{L1} = \Delta i_{L2}$, получаем, что амплитуда импульса выходного напряжения, равная напряжению на конденсаторе выходного фильтра C , определяется выражением

$$U_H = E \frac{t_n}{t_n} = E \frac{\gamma}{1 - \gamma}.$$

Из этого соотношения получаем, что при $\gamma < 0,5$ $U_H < E$ (этот случай показан на рис. 32.50, б), а при $\gamma > 0,5$ $U_H > E$. Так как это соотношение является произведением аналогичных соотношений для преобразователей I и II рода, преобразователь III рода можно рассматривать как последовательное соединение преобразователей I и II рода (это можно показать и путем преобразования схем рис. 32.48, а и 32.49, а). Вместо реактора в схеме рис. 32.50, а может быть включен трансформатор, позволяющий осуществить гальваническое разделение входной и выходной цепей (подробнее о преобразователях, которые можно получить из трех основных схем, см. разд. 60).

На рис. 32.51 показаны теоретические регулировочные характеристики $U_H/E = f(\gamma)$ для преобразователей всех трех родов. Эти же характеристики применимы и при использовании в этих преобразователях метода ЦИР, для чего надо заменить $\gamma = f t_n$, тогда режиму при $\gamma = 1$ будет соответствовать режим $f = 1/t_n$.

При практическом использовании импульс-

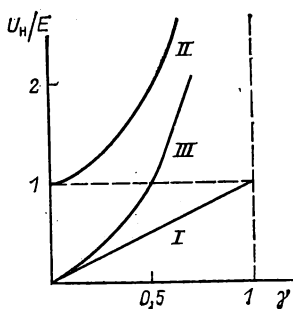


Рис. 32.51. Регулировочные характеристики импульсных преобразователей I, II и III рода (без учета влияния потерь и процессов в узлах коммутации)

ных преобразователей следует учитывать, что входной ток в схемах I и III рода является импульсным. Поэтому, если такой режим источника питания нежелателен или если этот источник содержит индуктивность (например, электромашинный генератор постоянного тока), вход таких преобразователей необходимо шунтировать сглаживающим конденсатором достаточно большой емкости.

Если в качестве VT применяется незапираемый (однооперационный) тиристор, его надо снабдить коммутационным узлом, обеспечивающим его запирающее (см. § 32.23).

32.22. УЗЛЫ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИИ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В преобразователях, построенных на незапираемых (однооперационных) тиристорах, для осуществления принудительной коммутации используют специальные коммутационные узлы (КУ), в состав которых в общем случае входят: конденсаторы, играющие роль источника коммутирующего напряжения, вспомогательные (коммутирующие) тиристоры (при двухступенчатой коммутации), диоды и реакторы. В зависимости от того, как коммутирующее напряжение вводится в цепь тиристора, который необходимо запереть, и нагрузки, все многочисленные схемы КУ можно разделить на две группы: с параллельной и с последовательной коммутацией.

При параллельной коммутации источник КУ коммутирующего напряжения u_K включается либо параллельно тиристор VT , который необходимо запереть, либо параллельно нагрузке (рис. 32.52, а и б). В любом из этих двух случаев напряжение на нагрузке u_H после запирающего VT определяется законом изменения u_K . Поскольку в качестве u_K обычно используется предварительно заряженный конденсатор, происходит его перезаряд током нагрузки после прекращения тока через VT . В результате кривая u_H и среднее или действующее значение этого напряжения при параллельной коммутации оказываются зависящими от тока нагрузки.

На рис. 32.53, а и б показаны схемы импульсных преобразователей постоянного напряжения с мгновенной коммутацией основного тиристора VT , поскольку в контуре $VT-VT_K-C_K$ отсутствует реактор. Рассмотрим кратко процессы в схеме рис. 32.53, а. При отпирании тиристора VT коммутирующий кон-

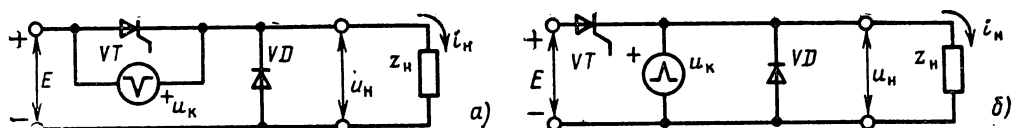


Рис. 32.52. Структурные схемы с параллельной коммутацией (на примере импульсного преобразователя постоянного напряжения)

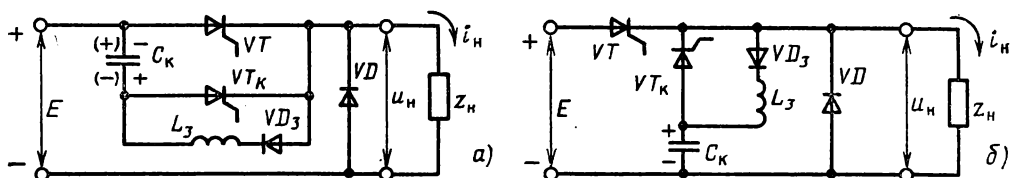


Рис. 32.53. Принципиальные схемы преобразователя с параллельной мгновенной коммутацией и линейным перезарядом конденсатора, соответствующие структурным схемам на рис. 32.52, а и б

денсатор C_k , заряженный на предыдущем цикле до напряжения E с полярностью, показанной на рис. 32.53,а знаками в скобках, перезарядается по цепи $VT-L_z-VD_z$, поэтому через VT , кроме тока нагрузки i_n , протекает полусинусоидальный импульс зарядного тока i_z (рис. 32.54,а). Напряжение на C_k изменяет знак (знаки без скобок на рис. 32.53,а) и становится равным $U_{C0} \approx E$ (рис. 32.54,б). Через время Δt_n , равное длительности основного импульса напряжения на нагрузке, отпирается коммутирующий тиристор VT_k (момент t_1) и напряжение u_n скачком возрастает на U_{C0} (рис. 32.54,б). При этом VT мгновенно запи-

рается. Затем C_k перезарядается током нагрузки, и если последний на этом интервале считать неизменным ($i_n \approx I_n = \text{const}$), напряжение u_c падает линейно. В момент $t=t_3$ $u_c = -E$ и $u_n = 0$ (рис. 32.54,в и б). После этого цикл повторяется. Среднее значение напряжения на нагрузке равно

$$U_n = \frac{1}{T} \left[E \Delta t_n + \frac{1}{2} (E + U_{C0}) (t_3 - t_1) \right],$$

где второе слагаемое в квадратных скобках равно вольт-секундной площади импульса треугольной формы (на рис. 32.54,б заштрихована), определяемого перезарядом конденсатора. Интервал $t_1 \dots t_3$ равен

$$t_3 - t_1 = C (E + U_{C0}) / I_n.$$

Следовательно,

$$U_n = E \gamma + \frac{C (E + U_{C0})^2}{2 I_n T}.$$

В течение интервала $t_1 \dots t_2$ на VT действует отрицательное напряжение. Следовательно, время, предоставляемое для выключения основного тиристора, в этой схеме равно

$$t_q = t_2 - t_1 = C U_{C0} / I_n.$$

Для схемы рис. 32.53,б, где на интервале $t_1 \dots t_3$ C_k разряжается от U_{C0} до нуля, аналогично получаем

$$U_n = E \gamma + \frac{C U_{C0}}{2 I_n T};$$

$$t_q = \frac{C (U_{C0} - E)}{I_n}.$$

Если учесть, что в схеме рис. 32.54,а $U_{C0} \approx E$, а в схеме рис. 32.54,б $U_{C0} \approx 2E$, выражения для U_n и t_q для обеих схем получаются одинаковыми.

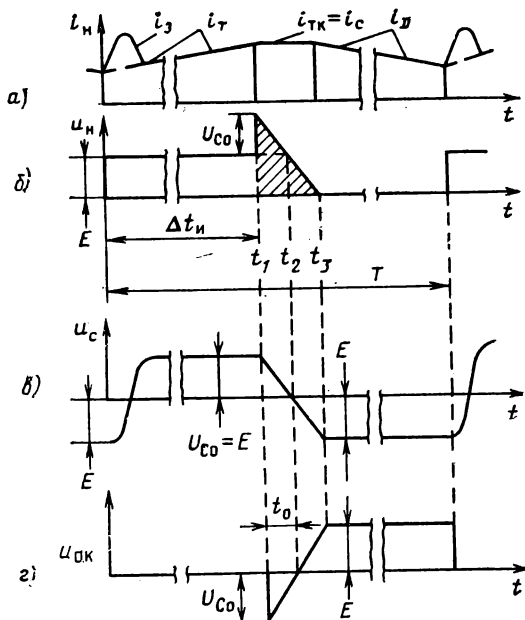


Рис. 32.54. Кривые токов и напряжений в схеме рис. 32.50, а

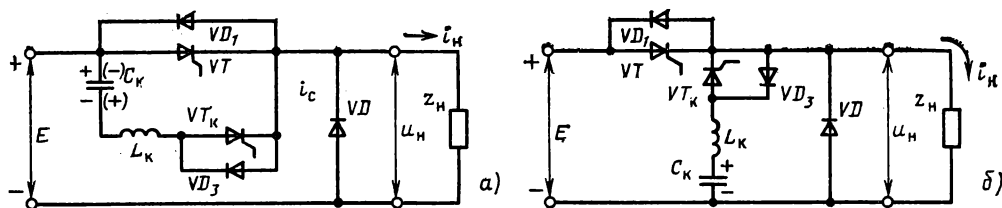


Рис. 32.55. Принципиальные схемы преобразователя с параллельной коммутацией и вынесенным из цепи основного тиристора колебательным LC-контуром, соответствующие структурным схемам на рис. 32.52, а и б

Зависимость U_H от тока нагрузки, особенно заметная при малых I_H и высоких частотах (причем при режимах, близких к холостому ходу, или при $f > f_{кр}$ запертие VT вообще оказывается невозможным), и быстрое нарастание тока через VTk при отпирании, а также наличие всплесков напряжения на нагрузке с амплитудой примерно $2E$ являются недостатками КУ с мгновенной коммутацией и линейным перезарядом коммутирующего конденсатора.

Устранение или ослабление этих недостатков достигается в схемах с колебательным перезарядом конденсатора. Число известных схем этого типа весьма велико (см. [32.11]). На рис. 32.55, а и б показаны в качестве примера две схемы импульсных преобразователей постоянного напряжения, полученные из схем рис. 32.53, а и б соответственно путем включения L_K в цепь конденсатора C_K (так что L_K выполняет функции зарядного и коммутирующего реакторов одновременно) и добавления диода VD_1 .

На рис. 32.56 показаны процессы в схеме рис. 32.55, а после отпирания коммутирующего тиристора VTk в момент t_0 , причем для упрощения картины опять принято, что в цепи нагрузки имеется значительная индуктивность и потому в течение всего коммутационного перезаряда конденсатора $i_H \approx I_H = \text{const}$. До момента t_0 на C_K было начальное напряжение U_{C0} . На интервале $t_0 \dots t_1$ ток $i_C = i_{VTk}$

нарастает, но $i_C < I_H$, а ток i_{VT} падает от значения I_H до нуля (рис. 32.56, а). При $t > t_1$, $i_C > I_H$, $i_{VT} = 0$ открыт диод VD_1 и его ток $i_{VD_1} = I_H - i_C$. В момент t_2 снова $i_C \approx I_H$ и $i_{VD_1} = 0$. На интервале $t_0 \dots t_2$ конденсатор C_K перезарядается в контуре $C_K - L_K - VT_k - VT$ (или VD_1), процесс перезаряда имеет колебательный характер, и поэтому i_C изменяется по синусоиде, а u_C — по косинусоиде, причем на второй половине интервала $t_0 \dots t_2$ изменяется полярность (знаки в скобках на рис. 32.55, а). На этом интервале к VT приложено небольшое обратное напряжение (рис. 32.56, б), равное прямому падению напряжения на VD_1 (примерно 1—1,5 В). До момента t_2 напряжение на нагрузке U_H остается равным E (если пренебречь падением напряжения на VT и VD_1).

Дальнейшие процессы при $t > t_2$ показаны на рис. 32.56 для случая, когда напряжение на C_K в момент t_2 $|U_{C2}| < E$. В этом случае после прекращения тока через VD_1 ток i_C остается некоторое время равным I_H («полочка» в кривой i_C на рис. 32.56, а), а u_C линейно нарастает (по абсолютному значению) до E . При $t = t_3$ $u_C = E$. На этом интервале $t_2 \dots t_3$ напряжение u_H линейно снижается от $E - U_{C2}$ до нуля, а прямое напряжение на тиристоре VT нарастает от $|U_{C2}|$ до E (рис. 32.56, в и г).

В момент t_3 создаются условия для отпирания шунтирующего диода VD и в схеме образуются два практически независимых контура: $Z_H - VD$ и $C_K - L_K - VT_k - VD - E$, причем $i_C < I_H$ и поэтому $i_{VD} = I_H - i_C > 0$. Процесс во втором контуре имеет колебательный характер, причем в связи с ненулевыми начальными условиями $i_{C3} = I_H$, $u_{C3} = -E$ ток i_C при $t > t_3$ спадает по косинусоиде (рис. 32.56, а); при $t = t_4$ $i_C = 0$. На этом интервале $t_3 \dots t_4$ происходит дозарядка C_K , и напряжение на нем возрастает (по абсолютному значению). Если пренебречь потерями в контуре, $U_{C4} = E + \rho I_H$, где $\rho = \sqrt{L_K/C_K}$ — волновое сопротивление контура.

В случае, если $|U_{C2}| > E$, моменты t_2 и t_3 сливаются, т.е. запираание VD_1 , когда ток в нем становится равным нулю, и отпирание VD происходят одновременно. В таком режиме без «полочек» в кривой тока i_C напряжение u_H в момент t_2 скачком падает до нуля, а u_{VT} скачком возрастает до E . При этом

$$U_{C4} = E + \sqrt{(U_{C2} - E)^2 + (\rho I_H)^2}.$$

Среднее значение напряжения на нагрузке (если пренебречь треугольной площадкой на интервале $t_2 \dots t_3$) равно

$$U_H = E [t_H + (t_2 - t_0)]/T,$$

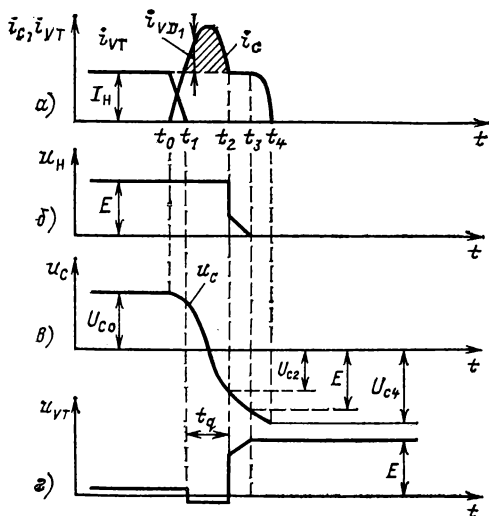


Рис. 32.56. Кривые токов и напряжений в схеме рис. 32.55, а

где t_n — длительность импульса напряжения от момента отпирания VT до момента t_0 . Из рассмотрения процесса перезаряда C_K [32.11] следует (при неучете потерь в контуре)

$$t_2 - t_0 = \left(\pi - \arcsin \frac{\rho I_n}{U_{C0}} \right) \sqrt{L_K C_K}.$$

Тогда

$$U_n = E \left[\gamma + \frac{\sqrt{L_K C_K}}{T} (\pi - \arcsin \rho I_n / U_{C0}) \right].$$

Время, предоставляемое для выключения VT ,

$$t_q = (\pi - 2 \arcsin \rho I_n / U_{C0}) \sqrt{L_K C_K}.$$

Обычно можно принять амплитуду импульса тока перезаряда конденсатора $I_C = U_{C0} / \rho$ равной $1,5 I_n$. Тогда с учетом выражения для t_q получаем следующие соотношения для определения L_K и C_K :

$$L_K = 0,27 U_{C0} t_q / I_n;$$

$$C_K = 0,61 t_q I_n / U_{C0}.$$

Для обеспечения надежной коммутации во всех режимах в эти формулы следует подставлять наименьшее возможное значение U_{C0} и наибольшее значение I_n . Для схемы типа рис. 32.56,б, где колебательный перезаряд C_K происходит в контуре, содержащем источник питания E (причем E действует навстречу начальному напряжению U_{C0}), во все вышеприведенные соотношения вместо U_{C0} следует подставлять $U_{C0} - E$.

Числовые расчеты показывают, что КУ с параллельной коммутацией при колебательном перезаряде конденсатора характеризуются значительно более слабой зависимостью U_n и t_q от тока нагрузки I_n , чем КУ с линейным перезарядом (т. е. типа рис. 32.56,а и б). Другим преимуществом является отсутствие всплесков напряжения u_n , срезаемых диодом VD_1 .

К недостаткам схем типа рис. 32.55,а и б можно отнести близкое к нулю обратное напряжение на основном тиристоре VT на интервале выключения, что требует увеличения времени t_d в 1,5—2,5 раза (в зависимости от типа прибора) по сравнению с паспортным значением, которое измеряется при определенном и значительном обратном напряжении. К тому же прямое напряжение прикладывается к VT скачком (рис. 32.56,з), что заставляет увеличивать емкость демпфирующего конденсатора в RC -цепочке, включаемой параллельно VT , и в обязательном порядке включать последовательно с VT защитный дроссель (линейный или насыщающийся), а также выбирать в качестве VT тиристоры с высокой допустимой du/dt .

Первый из отмеченных недостатков отсутствует в КУ с параллельной коммутацией, где L_K входит в цепь основного тиристора VT (рис. 32.57,а). При отпирании VT_K (например, при первоначальном включении схемы) C_K заряжается через цепь нагрузки с полярностью, показанной знаками в скобках. При последующем включении VT C_K перезарядается в контуре $C_K - VT - L_K - VD_1$, и полярность на нем

изменяется (знаки без скобок). Затем для запирания VT вновь отпирается VT_K , ток через VT мгновенно прекращается и C_K перезарядается в контуре $C_K - VT_K - L_K - VD_1$, пока $i_C > I_n$, причем прикладываемое к VT напряжение равно u_C (рис. 32.57,б). Наличие на интервале t_q обратного напряжения на VT позволяет выбрать это время равным (или с небольшим запасом в 20—30 %) паспортному времени запирания. Для этой схемы (см. [32.11])

$$t_q = \sqrt{L_K C_K} \operatorname{arccotg} t_q I_n / U_{C0}.$$

Недостатком всех схем с колебательным перезарядом конденсатора является эффект накопления энергии в контуре коммутации (или «накачки» энергии), выражающийся в росте напряжения на конденсаторе от одного периода к другому. Например, в схеме рис.

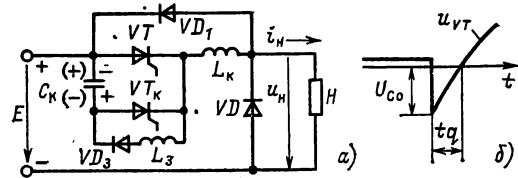


Рис. 32.57. Схема преобразователя с параллельной коммутацией и включенным в цепь основного тиристора коммутационным дросселем (а) и кривая напряжения на основном тиристоре (б)

32.55,а в результате дозарядки C_K на интервале $t_3 \dots t_4$ в контуре, образовавшемся после отпирания VD , напряжение U_{C4} может быть выше, чем начальное напряжение U_{C0} (см. рис. 32.56,в). Этот эффект заметнее при перезаряде в два этапа, т. е. без «полочки» и в кривой i_C (см. приведенные выше соотношения для U_{C4}). Еще более сильно он проявляется в схемах типа рис. 32.57,а, где коммутационный реактор L_K включен в цепь основного тиристора VT . В результате эффекта накопления напряжения на конденсаторе и на тиристорах, а также амплитудное значение тока I_C могут возрасти до опасных для этих элементов значений.

Эффект накопления ограничивается лишь в силу наличия потерь в элементах КУ, возрастающих при росте токов и напряжений, однако такое ограничение на практике может наступить, когда максимальное напряжение на элементах в 10 раз и более превысит E , что в схемах с напряжением питания выше 100 В, естественно, недопустимо (в низковольтных схемах, например при $E = 12$ или 27 В, этот эффект можно использовать для повышения коммутационной способности КУ при относительно небольших значениях емкости C_K).

Для ограничения эффекта накопления применяют специальные цепи отвода (или «сброса») энергии, основанные на введении в контур на определенных интервалах резисторов (используется редко) либо на выводе энергии из контура в цепь источника питания или в цепь нагрузки (подробнее — см. [32.11]).

При последовательной коммутации напряжение u_K вводит последовательно в цепь тиристора VT (см. рис. 32.52,в), поэтому ток i_n мгновенно переходит на шунтирующий диод

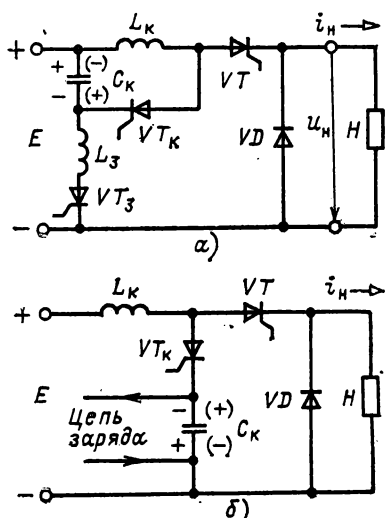


Рис. 32.58. Принципиальные схемы преобразователей с последовательной двухступенчатой коммутацией

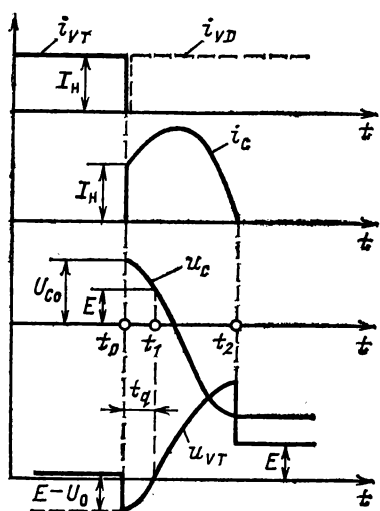


Рис. 32.59. Кривые токов и напряжений в схеме рис. 32.58, а

VD , а напряжение u_H сразу падает до нуля. Поэтому зависимость среднего или действующего значения напряжения на нагрузке от тока нагрузки в схемах с последовательной коммутацией почти отсутствует.

На рис. 32.58, а и б показаны две схемы импульсных преобразователей постоянного напряжения с КУ последовательного типа. В схеме рис. 32.58, а C_k заряжается с полярностью, показанной знаками без скобок, при отпирании зарядного тиристора VT_z , причем если перед этим C_k не был заряжен, напряжение на нем после заряда $U_{C0} \approx 2E$. Когда надо запретить VT , отпирается VT_k , напряжение U_{C0} оказывается приложенным к L_k , напряжение на VT скачком снижается до $E - U_{C0} \approx E$ и ток i_{VT} падает до нуля (рис. 32.59). При этом ток нагрузки сразу перебрасывается на VD , а напряжение U_H становится равным нулю. За-

тем C_k перезаряжается в контуре $C_k - L_k - VT_k$ (рис. 32.59, б и в), и напряжение на C_k снижается. В момент t_1 $u_C = E$ и, следовательно, $u_{VT} = 0$. Поэтому интервал $t_0 \dots t_1$ определяет время t_q , предоставляемое для запираания VT :

$$t_q = \sqrt{L_k C_k} \left[\arccos \frac{E}{\sqrt{U_{C0}^2 + (\rho I_H)^2}} - \arccos \frac{U_{C0}}{\sqrt{U_{C0}^2 + (\rho I_H)^2}} \right].$$

Затем полярность u_C изменяется на обратную (знаки в скобках на рис. 32.58, а), и в момент t_2 , когда i_C падает к нулю, напряжение на C_k равно

$$u_C(t=t_2) = U_{C2} = -\sqrt{U_{C0}^2 + (\rho I_H)^2}.$$

Таким образом, $|U_{C2}| > U_{C0}$, что опять означает наличие эффекта накопления энергии, обусловленного переходом энергии из L_k в C_k . Максимальное прямое напряжение на VT равно $E + \sqrt{U_{C0}^2 + (\rho I_H)^2}$, затем при $t > t_2$ скачком падает до E .

Если перезаряд C_k произвести снова через $L_z - VT_z$ от источника E , то будем иметь новое значение $U'_{C0} = E + \sqrt{U_{C0}^2 + (\rho I_H)^2}$, еще более увеличится значение U'_{C2} и т. д.

Схожие процессы имеют место в схеме рис. 32.58, б (на которой цепь первоначального заряда C_k не показана). Здесь в принципе может быть $U_{C0} \leq E$, однако

$$U_{C2} = -\sqrt{(E + U_{C0})^2 + (\rho I_H)^2}.$$

Сильное проявление эффекта накопления энергии в КУ с последовательной коммутацией требует обязательного применения здесь устройств «сброса» (отвода) энергии, обычно осуществляемых в виде добавочной обмотки на L_k с соответствующим числом витков, подключенной через диоды к источнику питания E .

Типовые схемы КУ, рассмотренные выше на примере тиристорных импульсных преобразователей постоянного напряжения, используются в автономных инверторах напряжения (см. § 32.26), а также в некоторых других преобразователях.

32.23. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПЯЖЕНИЯ С ДОЗИРОВАННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ

Преобразователи с дозированной передачей энергии за счет разряда конденсатора на нагрузку относятся к преобразователям напряжения с частотным управлением (ЧИП). Схемы наиболее распространенных преобразователей этого типа приведены на рис. 32.60, а и б. В схеме рис. 32.60, а имеет место передача энергии в нагрузку как при заряде током i_1 (контур $E - VT1 - C - VD2 - H$), так и при разряде конденсатора (контур $C - VT2 - H - VD1$).

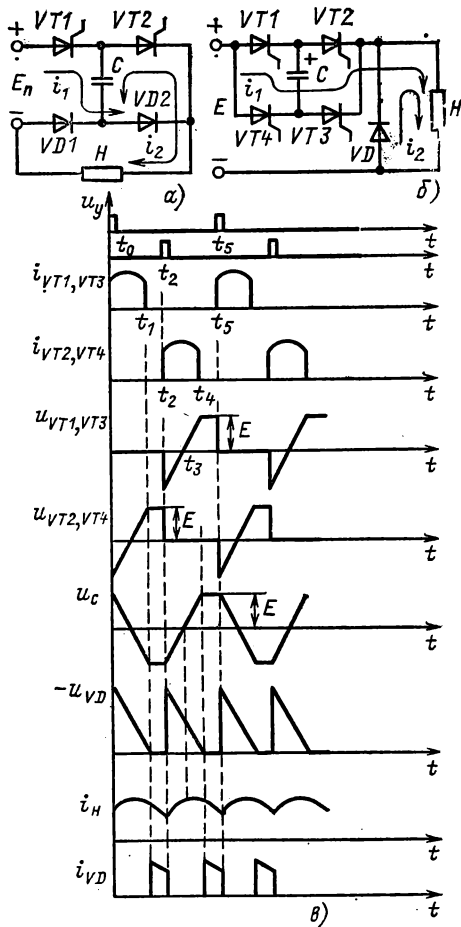


Рис. 32.60. Принципиальные схемы и временные диаграммы преобразователя постоянного напряжения с разрядом конденсатора на нагрузку

В схеме рис. 32.60, б имеются два симметричных цикла перезаряда конденсатора через нагрузку.

Временные диаграммы в схеме рис. 32.60, б для режима непрерывного тока изображены на рис. 32.60, в. В интервале $0-t_1$ открыты $VT1$ и $VT3$. Ток протекает по контуру $VT1-C-VT3-H$, конденсатор C заряжается. Если напряжение на конденсаторе u_c достигает значения E , то тиристоры $VT1$ и $VT3$ закрываются и включается диод VD , на аноде которого появляется положительный потенциал за счет ЭДС самоиндукции в L_H .

В интервале t_1-t_2 все тиристоры заперты и ток в цепи нагрузки замыкается по контуру $VD-H$ за счет энергии, запасенной в индуктивности на интервале $0-t_1$. В момент t_2 включаются $VT2$, $VT4$ и начинается перезаряд конденсатора до значения E с обратной полярностью (интервал t_2-t_4).

В рассмотренной схеме конденсатор выполняет функции коммутирующего элемента и одновременно осуществляет дозирование энергии, передаваемой в нагрузку. Энергия, поступающая в нагрузку за один такт перезаряда, $W = 2CE^2$. Мощность, передаваемая в нагрузку,

равна $P = Wf = 2E^2Cf$, так что за счет изменения частоты управляющих сигналов f можно регулировать мощность в нагрузке.

Максимально возможная частота коммутации ограничивается временем восстановления управляющих свойств тиристоров

$$f_{\max} < 1/2t_{\text{в}}.$$

Ниже приведены методы расчета преобразователя с дозированной передачей энергии для двух частных случаев: 1) нагрузка представляет собой последовательное соединение индуктивности L и противо-ЭДС E_H ; 2) нагрузка представляет собой последовательное соединение активного сопротивления R и индуктивности L .

Расчет схемы преобразователя для первого варианта схемы [32.22] проводим, исходя из заданных значений: максимально и минимально возможных средних значений тока нагрузки ($I_{d\max}$ и $I_{d\min}$), напряжения источника E , противо-ЭДС цепи нагрузки E_H , коэффициента пульсаций K_H , известного времени восстановления тиристора t_q .

Полный коэффициент пульсаций $K_H = (I_{\max} - I_{\min})/I_d$ определяется по графикам $K_H = f(I_{d*})$, приведенным на рис. 32.61, где $I_{d*} = I_d R / \rho$ — относительный средний ток, $\rho = \sqrt{L/C}$.

Восстановление управляющих свойств тиристоров $VT1$ и $VT3$ происходит за интервал времени $t_1 \dots t_3$ (см. рис. 32.52, в), причем в интервале $t_1 \dots t_2$ напряжение на тиристоре равно нулю, поэтому восстановление управляющих свойств происходит в основном на интервале $t_2 \dots t_3$, когда напряжение на тиристоре отрицательное.

Относительное время, предоставляемое для восстановления управляющих свойств тиристора $t_{q*} = t_q \sqrt{LC}$, может быть найдено из графиков $t_{q*} = f(I_{d*})$ (рис. 32.62).

Методика расчета схем, приведенных на рис. 32.60, а, б:

1. Исходя из заданного K_H , определяем по рис. 32.61 относительный ток I_{d*} . Найденное значение I_{d*} соответствует минимально возможному току нагрузки $I_{d\min}$.

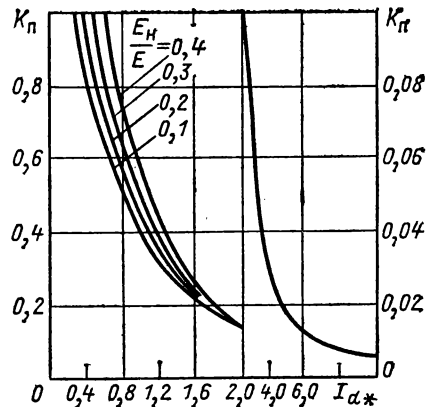
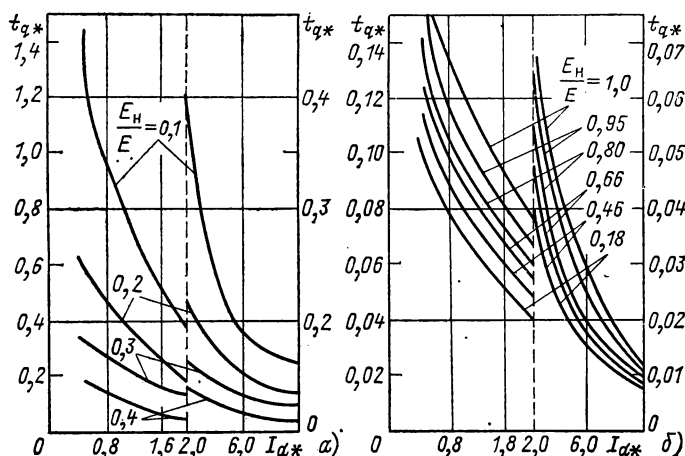


Рис. 32.61. Зависимость полного коэффициента пульсации относительного тока нагрузки для схемы преобразователя рис. 32.60

Рис. 32.62. Зависимость относительного времени, предоставляемого для восстановления управляющих свойств тиристора, от относительного тока нагрузки:

a — для схемы рис. 32.60, *a*;
б — для схемы рис. 32.60, *б*



2. Определяем относительный максимальный ток нагрузки

$$I_{dmax*} = I_{dmin*} \frac{I_{dmax}}{I_{dmin}}$$

3. По графикам рис. 32.62 находим относительное время, предоставляемое для восстановления управляющих свойств t_{q*} .

4. Находим необходимую индуктивность реактора L и конденсатора C :

$$L = \frac{I_{dmin} t_q (E - U_{C0})}{I_{dmax} \cdot 2\pi f_{q*}};$$

$$C = \frac{I_{dmin} t_q}{I_{dmin} (E - U_{C0}) 2\pi f_{q*}}.$$

Для схемы рис. 32.60, *a* $E - U_{C0} = E - E_n$;
для схемы рис. 32.60, *б* $E - U_{C0} = 2E - E_n$.

5. Определяем рабочий диапазон частот для схемы рис. 32.60, *a*

$$f_{min} = \frac{I_{dmin} E_n}{2E^2 C};$$

для схемы рис. 32.60, *б*

$$f_{min} = \frac{2I_{dmin} E_n}{E^2 C}.$$

Для обеих схем $f_{max} = f_{min} \frac{I_{dmax}}{I_{dmin}}.$

Когда нагрузка представлена индуктивностью L и активным сопротивлением R , электромагнитные процессы в схеме могут иметь аperiodический или колебательный характер. Границей перехода от аperiodического режима к колебательному является значение добротности

$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = 0.5$; при $Q < 0.5$ режим аperiodический, при $Q > 0.5$ — колебательный. При колебательном характере процессов возможны режимы разрывных и непрерывных токов.

Условие работы схемы в режиме разрывных токов — частота выходного напряжения

ИП f должна быть меньше двойной собственной частоты контура f_k , или $f < 2\omega_k/2\pi$, где

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{2Q} \sqrt{4Q^2 - 1}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ — значение}$$

собственной частоты контура при $R = 0$.

Расчет параметров схемы можно произвести, используя графические зависимости [32.17].

32.24. АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ

(общая характеристика)

Автономным (или независимым) инвертором (АИ) называется преобразователь постоянного напряжения в переменное, в присоединенной сети которого нет источников энергии той же частоты.

Основой любого АИ является вентильный коммутатор (ВК), т. е. совокупность управляемых и в общем случае неуправляемых вентилей, соединенных по определенной схеме (одно- или трехфазной нулевой или мостовой и т. д.) и осуществляющих переключение между выводами источника питания постоянного напряжения (тока) и нагрузки в определенной последовательности и с заданной частотой. Как со стороны нагрузки, так и со стороны источника питания в общем случае включаются LC -четырёхполюсники, служащие для согласования сопротивления источника и нагрузки по переменному току, для обеспечения условий коммутации вентилей и для фильтрации выходного переменного и (или) входного постоянного напряжения или тока инвертора. В зависимости от типа этих четырёхполюсников и от способа записания управляемых вентилей в ВК все автономные инверторы можно условно разделить на три большие группы: 1) инверторы тока (АИТ); 2) инверторы напряжения (АИН); 3) резонансные инверторы (АИР).

Эти группы инверторов, рассматриваемые в § 32.26—32.29, различаются не столько начертанием схем, сколько особенностями электромагнитных процессов и, следовательно, своими основными характеристиками: внешней (нагрузочной), гармоническим составом кривой выходного напряжения, зависимостью формы

кривой этого напряжения от параметров нагрузки и рабочей частоты и др. Эти особенности в конечном счете определяют области предпочтительного использования АИТ того или иного типа.

32.25. АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ ТОКА

Типовая схема АИТ показана на рис. 32.63, а (на примере включения тиристоров по однофазной мостовой схеме). Основными особенностями такого инвертора являются:

а) непрерывный (а в предельном случае — идеально сглаженный) входной ток i_d (рис. 32.63, б), для чего источник питания должен иметь характеристики источника тока. На практике это условие обеспечивается за счет включения на входе инвертора индуктивности L_d , создающей во входной цепи режим источника тока по переменной составляющей;

б) емкостный характер цепи нагрузки инвертора, необходимый для принудительной коммутации вентилей при указанном выше характере входной цепи (поскольку при индуктивном характере цепи нагрузки и наличии индуктивности в цепи тока i_d коммутация вентилей была бы невозможна) и обеспечиваемый за счет включения конденсатора параллельно выходным зажимам (C_1 на рис. 32.63, а), последовательно с нагрузкой (C_2 , показанный пунктиром) или в общем случае за счет комбинированного выключения параллельных и последовательных конденсаторов. Соответственно инверторы в этих случаях называются *параллельными*, *последовательными*, *последовательно-параллельными* и т. д.;

в) возможность в силу особенности «б» использования обычных незапираемых тиристор-

ов, которые образуют вентильный коммутатор ВК (рис. 32.63, а). При параллельном конденсаторе тиристоры ВК практически мгновенно переключают входной ток i_d , поэтому выходной ток ВК i_n имеет форму знакопеременных импульсов (рис. 32.63, в). При этом напряжение на нагрузке u_n зависит от схемы ее замещения и соотношения параметров, емкости конденсаторов в цепи нагрузки и способа их включения, рабочей частоты. В случае параллельного АИТ кривая этого напряжения оказывается более сглаженной, чем кривая тока i_n . В любом случае момент перехода кривой выходного напряжения ВК через нуль должен отставать от момента перехода через нуль выходного тока i_n , что необходимо для обеспечения в кривой напряжения на тиристорах u_a сразу после коммутации импульса обратного напряжения (рис. 32.63, г) в течение времени t_q , требуемого для восстановления управляющих свойств.

Таким образом, конденсатор в схеме параллельного АИТ играет роль одновременно коммутирующего, сглаживающего (поскольку через него замыкаются высшие гармоники тока i_n и тем самым он улучшает кривую u_n) и компенсирующего (поскольку он генерирует реактивную мощность, потребляемую активно-индуктивной нагрузкой). В схеме последовательного АИТ, которая используется реже, вторая из указанных функций отсутствует.

К числу достоинств АИТ относятся: простота, так как возможно использование обычных незапираемых тиристоров без каких-либо коммутационных узлов, и сравнительно хорошая форма кривой выходного напряжения при наличии на выходе параллельного конденсатора. Основными недостатками АИТ являются падающая внешняя характеристика (см. ниже) и зависимость величины и формы кривой выходного напряжения от частоты, в связи с чем обычно АИТ используют при стабильной рабочей частоте, которая, как правило, лежит в диапазоне от 50 до 1000 Гц.

Для согласования напряжений нагрузка часто включается через трансформатор. В однофазной нулевой схеме (рис. 32.64) трансформатор является необходимым элементом, так как один из выводов источника питания подключен к средней точке его вентильных обмоток.

На рис. 32.65, а показана трехфазная мостовая схема АИТ. Номера тиристоров соответствуют очередности их вступления в работу (рис. 32.65, б). Каждый тиристор открыт в течение интервала $2\pi/3$, так как при отпирании следующего тиристора той же группы (анодной или катодной) ранее проводивший тири-

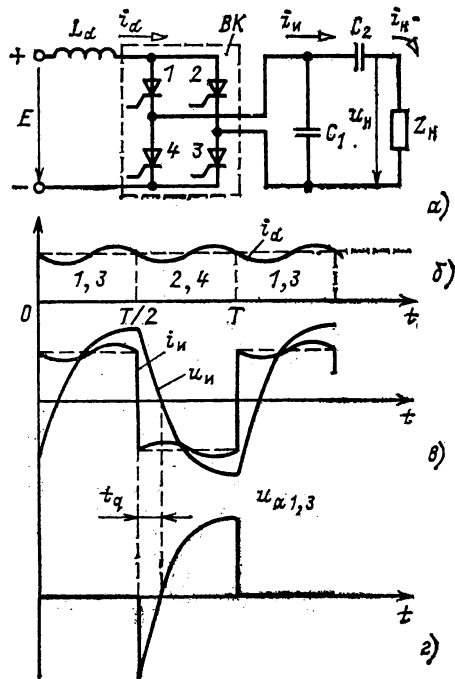


Рис. 32.63: Схема однофазного мостового инвертора тока (а) и диаграммы токов и напряжений, иллюстрирующие его работу (б, в и г)

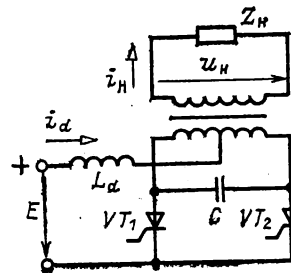


Рис. 32.64: Схема однофазного параллельного инвертора с выводом нулевой точки трансформатора

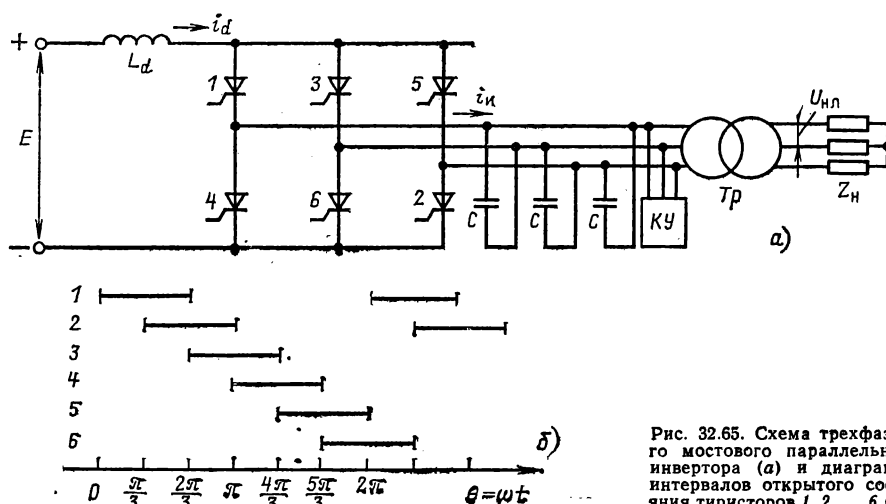


Рис. 32.65. Схема трехфазного мостового параллельного инвертора (а) и диаграмма интервалов открытого состояния тиристоров 1, 2, ..., 6 (б)

тор запирается за счет напряжения на соответствующем коммутирующем конденсаторе. При этом ток одновременно проходит через два тиристора — один в анодной и один в катодной группе, например 1 и 6, затем 1 и 2, 2 и 3 и т. д.

Кратность частоты гармоник, содержащихся в кривой напряжения на нагрузке АИТ, определяется выражением

$$n = f_2/f = km \pm 1,$$

где f — рабочая частота, определяемая частотой импульсов управления на каждом из тиристоров; m — фазность схемы, т. е. число одновременно вступающих в работу тиристоров на периоде частоты f , $k=1, 2, 3 \dots$

Для однофазных схем (см. рис. 32.63, а и 32.64) $m=2$ и $n=1, 3, 5 \dots$ Для трехфазной мостовой схемы (рис. 32.65, а) $m=6$ и $n=1, 5, 7, 11, 13 \dots$ Поэтому форма кривой u_n у последней схемы лучше приближается к синусоиду, чем у однофазных АИТ.

Для расчета характеристик АИТ часто используется метод основной гармоники, согласно которому вентильный коммутатор вместе с цепью источника питания заменяется генератором синусоидального тока. В случае, когда непосредственно к выходным выводам ВК подключен конденсатор (т. е. параллельный, последовательно-параллельный или параллельно-последовательный инверторы), выходной ток ВК i_n имеет характер прямоугольных импульсов (в предположении, что ток i_d идеально сглажен: $i_d = I_d$). При этом действующее значение синусоидального тока эквивалентного генератора или, что то же, действующее значение основной гармоники тока i_n равно: в случае однофазных АИТ (см. рис. 32.63, а и 32.64)

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d; \text{ в случае трехфазного мостового АИТ (рис. 32.65, а), у которого ток } i_n \text{ состоит из прямоугольных разнополярных импульсов длительностью } 2\pi/3, \text{ разделенных паузами } \theta = \pi/3,$$

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d \cos \frac{\theta}{2} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d.$$

Действующее значение напряжения на нагрузке параллельного АИТ связано с напряжением питания соотношением

$$U_n = n_{тр} E / a_{сх} \cos \beta,$$

где $n_{тр} = \omega_2/\omega_1$ — коэффициент трансформации трансформатора (в схеме рис. 32.64 под ω_1 следует понимать число витков половины первичной обмотки); $a_{сх}$ — коэффициент, зависящий от схемы инвертора: для однофазных схем (см. рис. 32.63, а и 32.64) $a_{сх} = 2\sqrt{2}/\pi = 0,9$, для трехфазной мостовой схемы (рис. 32.65, а) $a_{сх} = 2,34$, при этом под U_n следует понимать фазное напряжение; β — угол, на который основная гармоника тока i_n опережает основную гармонику u_n и который таким образом определяет время, предоставляемое для восстановления управляемости тиристоров. При работе инвертора этот угол должен быть больше или в крайнем случае равен критическому углу β_{min} , соответствующему (обычно с запасом в 1,3—1,5 раза) паспортному времени выключения тиристоров t_q при наивысшей рабочей частоте f_{max} :

$$\beta \geq \beta_{min} = (1,3 \div 1,5) \cdot 360^\circ f_{max} t_q.$$

Внешние характеристики параллельного АИТ, построенные по полученному методом основной гармоники соотношению

$$\frac{a_{сх} U_n}{n_{тр} E} = \frac{1}{\cos \beta} = \sqrt{1 + \left(\frac{1 - B \sin \varphi_n}{B \cos \varphi_n} \right)^2},$$

показаны на рис. 32.66 для различных значений коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_n$. В этом соотношении величина $B = n_{тр}^2 / \omega C z_n$ — отношение приведенной к вентильной стороне трансформатора проводимости нагрузки к проводимости коммутирующего конденсатора, называемое часто степенью нагрузки инвертора. По оси абсцисс на рис. 3.66 отложена степень активной нагрузки $B_a = B \cos \varphi_n$, где $\varphi_n = \arctg \omega L_n / R_n$.

Величина $a_{сх} U_n / n_{тр} E$, стоящая в левой части последнего соотношения и отложенная по оси ординат на рис. 32.66, является относительным выходным напряжением инвертора

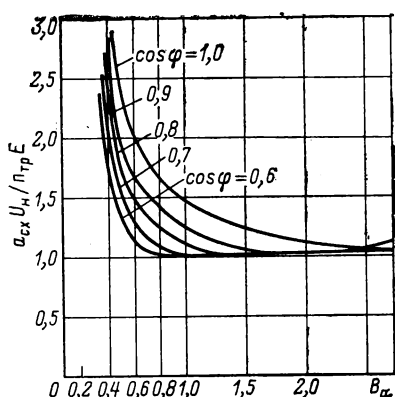


Рис. 32.66. Внешние характеристики параллельного инвертора тока

(с учетом коэффициента a_{cx}). Из связи этой величины с углом β следует, что точки внешних характеристик на рис. 32.66, расположенные ниже прямой $\frac{a_{cx} U_n}{k_{тр} E} = \frac{1}{\cos \beta_{min}}$, недопустимы из-за нарушения коммутационной устойчивости инвертора.

Выбрав положение рабочей точки на семействе внешних характеристик, определяем по заданным U_n , E и a_{cx} величину $n_{тр}$ и по величине B_n и известным параметрам нагрузки z_n , $\cos \varphi_n$ находим необходимую емкость конденсатора. Последнюю можно также найти непосредственно по соотношению

$$C = \frac{n_{тр}}{\omega z_n} (\operatorname{tg} \beta \cos \varphi_n + \sin \varphi_n).$$

На рис. 32.67 показаны характеристики выходного тока параллельного инвертора в относительных единицах при различных $\cos \varphi_n$, т. е. зависимости отношения входной проводимости инвертора I_d/E к проводимости конденсатора (с учетом коэффициента схемы a_{cx} и в расчете на одну фазу от степени нагрузки):

$$\frac{a_{cx}^2 I_d}{m E \omega C} = B \cos \varphi_n \left[1 + \left(\frac{1 - B \sin \varphi_n}{B \cos \varphi_n} \right)^2 \right].$$

Индуктивность дросселя L_d в цепи постоянного тока обычно выбирают из условия не-

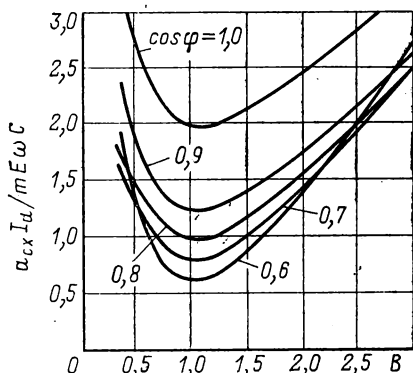


Рис. 32.67. Входные характеристики параллельного инвертора тока

прерывности тока. Для трехфазной мостовой схемы при $\beta < \pi/6$

$$L_d > \frac{E [1 - \cos (\beta + \pi/6)]}{72 f I_d \cos \beta}$$

и при $\beta > \pi/6$

$$L_d > \frac{E \operatorname{tg} \beta}{72 f I_d}.$$

В эти соотношения следует подставлять минимально возможные значения тока I_d .

Резкий подъем выходного напряжения (см. рис. 32.66) и обусловленный этим рост входного тока (рис. 32.67) при малых B_n или B , т. е. в режимах, близких к холостому ходу, является существенным недостатком параллельного инвертора, так как на практике обычно требуется иметь напряжение, не зависящее от параметров нагрузки, а рост входного тока приводит к увеличению потерь в элементах схемы. При питании инвертора от источника с регулируемым выходным напряжением, например управляемого выпрямителя, стабилизация или изменение по определенному закону напряжения на выходе инвертора осуществляется за счет соответствующего регулирования этого источника.

Однако в ряде случаев регулировать напряжение питания нельзя, например, при питании инвертора от аккумуляторной батареи. В этом случае стабилизация или регулирование напряжения инвертора осуществляется внутренними средствами. Зависимость выходного напряжения от угла β означает, что, изменяя угол β , можно обеспечить изменение напряжения на нагрузке. Угол β можно регулировать, изменяя соотношение между активной и реактивной составляющими тока, потребляемого от инвертора. Это достигается чаще всего с помощью компенсирующего устройства (КУ), подключенного к выходу инвертора (рис. 32.65). На рис. 32.68 показано так называемое индуктивно-тиристорное КУ (или, иначе, тиристорный регулятор индуктивности тока), которое состоит из реакторов, подключаемых через встречно-параллельные тиристоры к выходу инвертора. Действие такого устройства заключается в компенсации возникающего при разгрузке инвертора, т. е. уменьшении B избытка реактивной мощности, поэтому его и называют компенсирующим. Изменение реактивной мощности, потребляемой КУ, осуществляется изменением фазы управляющих импульсов тиристоров КУ α_k относительно фазы переменного напряжения на выходе инвертора. Цепь из

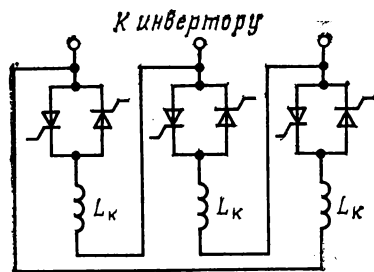


Рис. 32.68. Схема трехфазного индуктивно-тиристорного компенсирующего устройства

двух встречно-параллельных тиристоров и дросселя L_k можно по основной гармонике рассматривать как переменную индуктивность L_a , которая зависит от угла α_k [32.5]:

$$L_a = \frac{\pi L_k}{\pi - 2\alpha_k - \sin 2\alpha_k}.$$

В этом случае относительное выходное напряжение инвертора и угол β связаны со степенью нагрузки B , коэффициентом мощности нагрузки $\cos \varphi_n$ и параметром $D = 1/\omega^2 CL_a$ соотношением

$$\frac{a_{сх} U_n}{n_{тр} E} = \frac{1}{\cos \beta} \sqrt{1 + \left(\frac{1 - B \sin \varphi_n - D}{B \cos \varphi_n} \right)^2}.$$

В частотно-регулируемом электроприводе переменного тока используются модифицированные схемы АИТ: с отсекающими диодами (рис. 32.69) или с непрямой (двухступенчатой) коммутацией (рис. 32.69, б). В первой из них

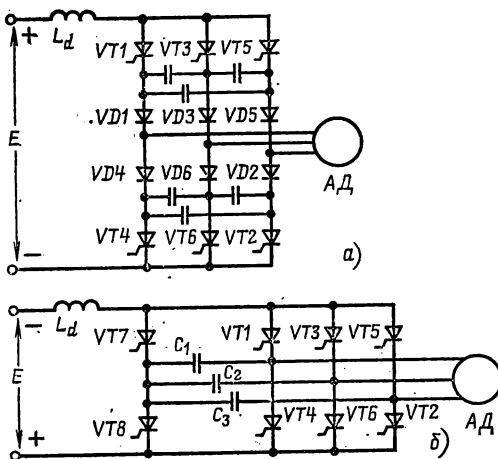


Рис. 32.69. Схема трехфазного мостового инвертора тока с отсекающими диодами (а) и с непрямой коммутацией (б) при работе на асинхронный двигатель АД

конденсаторы разделены на две группы, которые отделены от нагрузки (асинхронный двигатель АД) диодами $VD1—VD6$, препятствующими разряду конденсаторов на нагрузку. Поэтому такой инвертор может работать при изменяемой в определенном диапазоне частоте и, в частности, при низких частотах (начиная с единиц Гц).

В инверторе по рис. 32.69, б введены коммутрующие тиристоры $VT7, VT8$, работающие попеременно с утроенной частотой. При отмирании, например, $VT7$ осуществляется запирающее проводившего ранее тиристора анодной группы $VT1, VT3$ или $VT5$; после перезаряда соответствующего конденсатора C_1, C_2 или C_3 отпирается следующий по порядку работы основной тиристор этой группы. Аналогично происходит коммутация в катодной группе; например, с $VT2$ на $VT6$ и затем с $VT6$ на $VT4$. Такая двухступенчатая коммутация также позволяет уменьшить зависимость выходного напряжения от параметров нагрузки (напри-

мер, от величины потребляемого АД тока) и от рабочей частоты. Однако в этой схеме, как и в инверторе по рис. 32.69, а, при перегрузке по току возможно возникновение перенапряжений на конденсаторах и на тиристорах, в связи с чем необходимы специальные ограничители напряжения.

32.26. АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ

Простейший однофазный инвертор напряжения (рис. 32.70, а) формирует на нагрузке напряжение U_n прямоугольной формы (рис. 32.70, б), а кривая тока в нагрузке i_n зависит от характера нагрузки и ее параметров. В каждом плече моста показан запираемый (двух-операционный) тиристор. На практике при мощности до 3—5 кВт часто используются транзисторы, а при большей мощности или при $E > 300 + 400$ В незапираемые (однооперационные) тиристоры с теми или иными узлами принудительной коммутации. В дальнейшем предполагаем, что эти узлы не влияют на форму кривой выходного напряжения.

В случае активно-индуктивной нагрузки ток i_n имеет форму, показанную на рис. 32.70, б, и его первая гармоника отстает по фазе от напряжения. Поэтому необходимо обеспечить путь для протекания тока на тех интервалах времени, когда знаки тока и напряжения противоположны; для этого служат обратные диоды $1'—4'$. Так как ток в активно-индуктивной нагрузке не может изменяться скачком, то после запирающих тиристоров 1 и 3 он продолжает протекать в том же направлении через диоды 2' и 4' и источник. После перехода кривой тока i_n через нуль он переходит с диодов на тиристоры 2 и 4, причем в цепи источника питания ток $i_{вх}$ также изменяет знак (рис. 32.70, в).

Таким образом, характерными особенностями автономных инверторов напряжения (АИН) являются:

а) питание от источника напряжения, в связи с чем входное напряжение можно считать неизменным. Для придания реальным источникам свойств источника напряжения практически всегда вход инвертора шунтируют конденсатором C достаточно большой емкости (который является обязательным в случае таких источников, как электромашинный генератор постоянного тока или выпрямитель, и желательным даже в случае питания АИН от аккумуляторной батареи);

б) импульсный характер выходного напряжения; в связи с этим АИН не может работать на нагрузку, шунтированную емкостью, либо при необходимости включения такой емкости, например, для сглаживания кривой u_n последовательно должна быть включена разделяющая индуктивность (так что получается Г-образный сглаживающий фильтр);

в) необходимость использования запираемых вентилей (транзисторов, запираемых тиристоров) либо при использовании незапираемых тиристоров необходимость применения тех или иных коммутационных узлов (КУ). Сюда же можно отнести необходимость шунтирования тиристоров встречными диодами ($1'—4'$ рис. 32.70, а), через которые замыкается ток на-

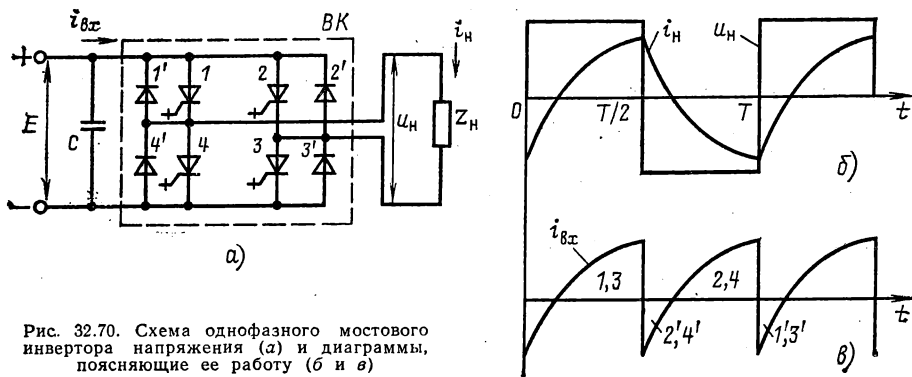


Рис. 32.70. Схема однофазного мостового инвертора напряжения (а) и диаграммы, поясняющие ее работу (б и в)

грузки на интервалах, когда в силу реактивного характера нагрузки выходные напряжение u_H и ток i_H инвертора имеют разные знаки (рис. 32.70, б, в). Таким образом, плечи вентильного коммутатора ВК в АИН имеют двустороннюю проводимость, и через них осуществляется энергообмен между цепью нагрузки, если последняя имеет реактивный характер, и цепью источника питания, в которой основную роль играет входной конденсатор C .

Достоинствами АИН являются: жесткая внешняя характеристика, независимость формы кривой выходного напряжения от параметров нагрузки, возможность работы при переменной частоте и, в частности, при низких и сверхнизких частотах (единицы и доли Гц). К числу основных недостатков следует отнести: несинусоидальность выходного напряжения, что во многих случаях требует применения на выходе сглаживающих фильтров, и необходимость применения в тиристорных АИН коммутационных узлов. Схема трехфазного мостового АИН (рис. 32.71, а) аналогична схеме однофазного. В том случае, когда длительность открытого состояния каждого управляемого вентиля равна π [и, следовательно, в открытом состоянии всегда находятся три тиристора (рис. 32.71, б)], кривые фазных u_{a0} , u_{b0} и u_{c0} и линейного (например, u_{ab}) напряжений имеют вид, показанный на рис. 32.71, в и г. При этом гармонический состав выходного линейного напряжения определяется следующим соотношением:

$$u_{H, \pi} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} E \sum_{n=km \pm 1} \frac{\sin n\vartheta}{n},$$

где $k=0, 1, 2, 3, \dots$; $m=6$; n — номер гармоники, присутствующей в выходном напряжении.

В выходном напряжении трехфазного мостового инвертора отсутствуют гармоники, кратные трем. Из приведенного соотношения видно, что относительное значение 5-й гармоники равно 20 %, основной 7-й — 14,3 %, 11-й — 9 %, 13-й — 7,7 % и т. д.

Трехфазный АИН может быть также составлен из трех однофазных мостовых с тремя отдельными трансформаторами (рис. 32.72). Вторичные обмотки трансформаторов должны быть соединены в звезду, при этом гармоники, кратные трем, имеющиеся в напряжении однофазных инверторов, в кривой результирующего напряжения на нагрузке будут отсутствовать.

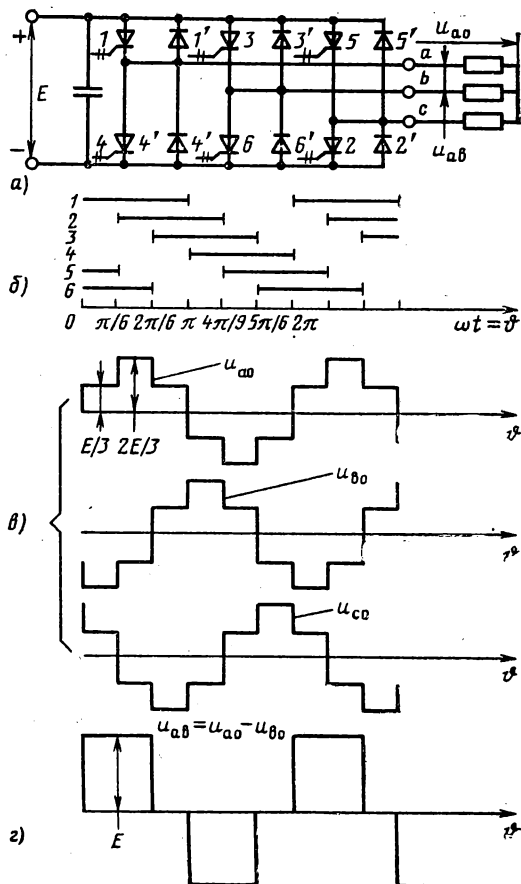


Рис. 32.71. Схема трехфазного мостового инвертора напряжения (а), интервалы открытого состояния тиристоров 1, 2, ..., 6 (б), кривые фазных (в) и линейного (г) напряжений

При практическом использовании АИН часто возникает необходимость регулировать значение величины первой гармоники выходного напряжения $U_{a(1)}$ при неизменном напряжении питания E или стабилизировать $U_{a(1)}$ при изменяющемся E . Обычно при этом также требуется, чтобы гармонический состав напряжения

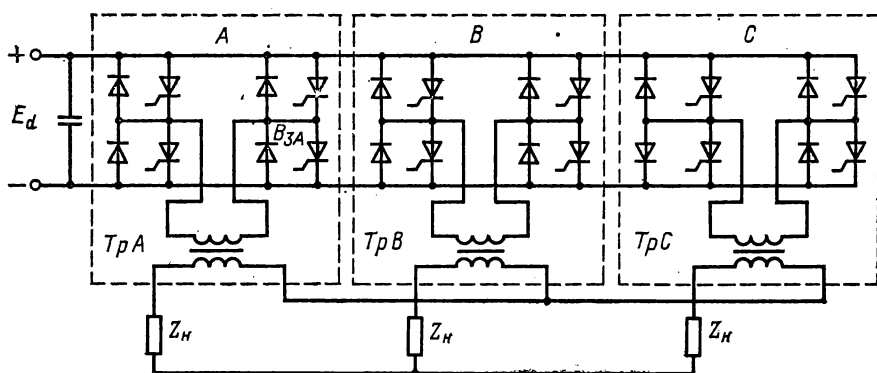


Рис. 32.72. Трехфазный инвертор напряжения, составленный из трех однофазных мостовых

(т. е. содержание высших гармоник) значительно не ухудшался.

Регулирование (или стабилизация) напряжения на нагрузке внутренними средствами (т. е. при отсутствии воздействия на напряжение питания) в инверторах напряжения возможно за счет изменения длительности импульсов, образующих кривую этого напряжения. При этом возможны следующие методы формирования кривой выходного напряжения и его регулирования (на примере однофазного мостового инвертора рис. 32.70, а):

1. *Широтное регулирование* (или регулирование «по длительности») с однократным включением каждого тиристора в течение периода выходной частоты (рис. 32.73). Изменение напряжения осуществляется за счет изме-

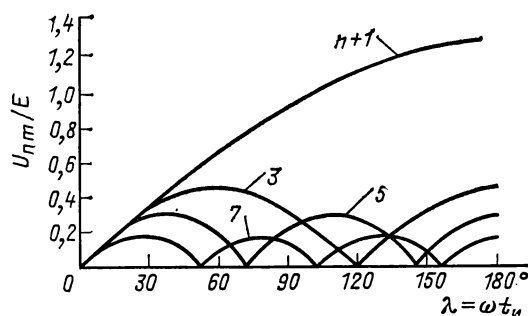


Рис. 32.74. Изменение гармонического состава выходного напряжения однофазного инвертора при широтном регулировании:

цифры у кривых — номера гармоник

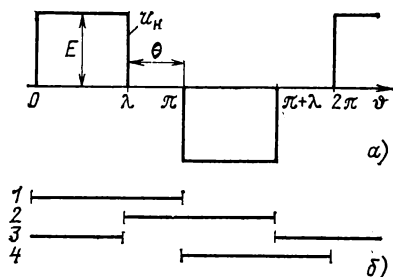


Рис. 32.73. Кривая выходного напряжения АИН при широтном регулировании (а) и интервалы открытого состояния управляемых вентилей (б) в схеме рис. 32.70, а

нения паузы θ между импульсами длительностью λ , образующими кривую выходного напряжения (рис. 32.73, б). Действующее значение выходного напряжения $U_{\text{н}} = EV\sqrt{2\lambda T}$. Гармонический состав кривой $u_{\text{н}}$ определяется соотношением

$$u_{\text{н}} = \frac{4E}{\pi} \sum_{k=0,1,2,\dots}^{\infty} \frac{\sin(2k+1)\theta}{2k+1} \times \cos(2k+1)\frac{\theta}{2}.$$

Этот способ можно реализовать, оставив длительность открытого состояния каждого тиристора равной π и сдвинув моменты переключения тиристоров полумоста 1, 4 относительно моментов переключения тиристоров полумоста 2, 3 на угол θ (рис. 32.73, б). Этот достаточно простой способ регулирования связан, однако, с изменением содержания относительно низкочастотных гармоник в кривой выходного напряжения при регулировании длительности импульсов (рис. 32.74), что затрудняет фильтрацию гармоник и приводит к необходимости использовать громоздкие выходные фильтры.

2. *Широтно-импульсное регулирование (ШИР)*, при котором выходное напряжение АИН формируется на каждом полупериоде из нескольких импульсов одинаковой длительности, разделенных паузами $\theta = \omega t_{\text{н}}$ (рис. 32.75).

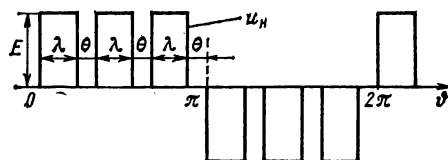


Рис. 32.75. Кривая выходного напряжения однофазного инвертора при широтно-импульсном регулировании действующего значения или значения первой гармоники

Изменяя длительность этих импульсов, формируемых путем соответствующего алгоритма управления вентилями, при сохранении постоянной их частоты следования $f_k = 1/(t_m + t_n)$ в течение каждого полупериода можно обеспечить изменение напряжения на нагрузке от максимального, когда $\theta = 0$, до минимального (при $\lambda = \lambda_{min}$) значения. При таком «импульсном» регулировании в кривой выходного напряжения изменяется в основном содержание относительно высокочастотных гармоник, обусловленных частотой следования импульсов f_k , но так как эта частота высока, гармоники могут быть легко сглажены. В то же время низкочастотные гармоники, обусловленные прямоугольной формой огибающей «пакета импульсов» за полпериода выходной частоты инвертора, остаются приблизительно неизменными во всем диапазоне регулирования.

3. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) (рис. 32.76). Этот способ основан на непре-

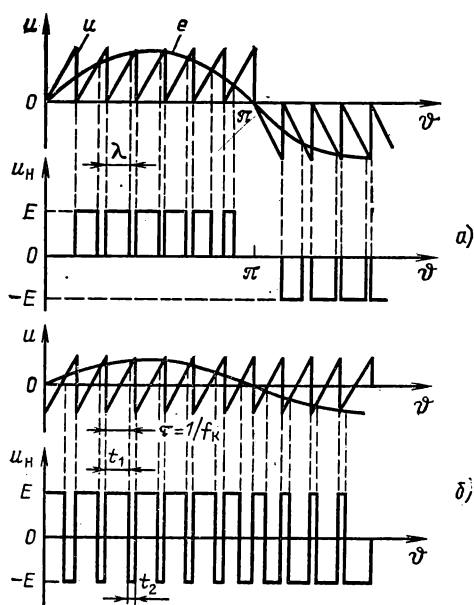


Рис. 32.76. Формирование выходного напряжения АИН методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ):

а — однополярная ШИМ; б — двухполярная ШИМ

рывном изменении (модуляции) по синусоидальному или близкому к нему (трапецидальному, треугольному) закону длительности высокочастотных импульсов, образующих кривую выходного напряжения инвертора. При формировании напряжения методом ШИМ происходит сравнение модулирующего сигнала (например, синусоидальной формы) $e(t)$, имеющего частоту, равную частоте АИН f с пилообразным (треугольным) напряжением $u(t)$ «несущей» частоты $f_k \gg f$. В моменты равенства этих напряжений вырабатываются управляющие импульсы, поступающие на соответствующие тиристоры инвертора, и на нагрузке формируется кривая напряжения в виде импульсов переменной длительности (ШИМ I рода).

При модуляции одного из фронтов получаем одностороннюю ШИМ, а обоих фронтов — двустороннюю ШИМ. Модуляция обоих этих видов может быть или однополярной (рис. 32.76, а) или двухполярной (рис. 32.76, б). В первом случае в течение полупериода выходной частоты инвертора f импульсы имеют одну полярность, во втором — выходное напряжение инвертора образовано импульсами чередующейся полярности и на каждом полупериоде выходного напряжения импульсы соответствующей полярности имеют большую длительность.

При однополярной модуляции наибольшее значение выходного напряжения получается при изменении длительности импульса t_m от нуля до наибольшей возможной, которая в пределе равна периоду частоты следования импульсов $T_k = 1/f_k$. При двухполярной модуляции сумма длительности положительного и отрицательного импульсов ($t_1 + t_2$) всегда равна $T_k = 1/f_k$, поэтому изменение выходного напряжения инвертора получается при изменении длительности импульсов каждой полярности от нуля до максимально возможной t_1 или $t_2 \rightarrow T_k$, которая лимитируется временем восстановления запирающих свойств вентилях. При обоих видах модуляции уменьшение наибольшей длительности импульсов, т. е. коэффициента модуляции $\gamma = t_m/T$, приводит к снижению основной гармоники выходного напряжения.

При достаточно высоком отношении частот f_k/f в выходном напряжении инвертора содержатся только гармоники весьма высокого порядка, поэтому для их сглаживания достаточно довольно простых фильтров.

Переход от простейшего способа формирования кривой выходного напряжения и его регулирования по длительности к более сложным способам ШИР и ШИМ облегчает сглаживающие фильтры и в конечном счете приводит к лучшей форме кривой выходного напряжения, но одновременно существенно усложняет систему управления инвертором, утяжеляет режим работы коммутационных узлов, которые должны работать на повышенной частоте, увеличивает коммутационные потери. Поэтому ШИР и ШИМ целесообразно использовать при сравнительно невысоких рабочих частотах инвертора (до 50—100 Гц). При повышенных частотах (200—400 Гц) обычно применяют регулировку по длительности.

Качество несинусоидальной прямой выходного напряжения инвертора оценивается с помощью коэффициента гармоник

$$k_g = \sqrt{\sum_{n>1}^{\infty} U_{nн}^2 / U_{н, действ}^2},$$

который представляет собой отношение действующего значения напряжения всех высших гармоник к действующему значению напряжения; здесь $n = km \pm 1$ — номер гармоники, $k = 1, 2, 3, \dots$, m — число фаз инвертора.

Улучшение гармонического состава напряжения однофазного инвертора можно получить путем получения многоступенчатой кривой (рис. 32.77) за счет суммирования напряжений нескольких инверторов, выходы которых соединены последовательно. Выходные напряжения инверторов имеют одну частоту, но разные фа-

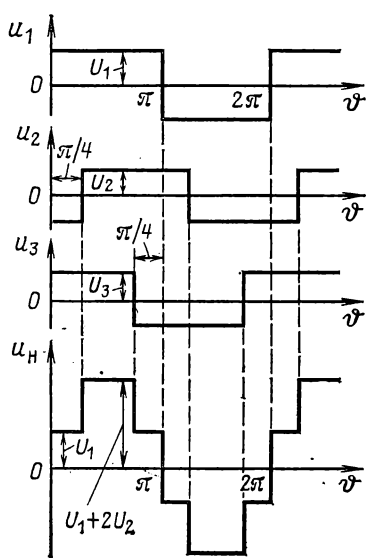


Рис. 32.77. Формирование ступенчатой кривой напряжения путем суммирования сдвинутых по фазе напряжений нескольких инверторов

зовый сдвиг и разную амплитуду. Гармонический состав кривой рис. 32.77 (при $U_3 = U_2$)

$$u_H = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \left(U_1 + 2U_2 \cos \frac{\pi n}{4} \right) \cos n\vartheta.$$

Для исключения 3-й и 5-й гармоник необходимо $U_1 = \sqrt{2}U_2$, при этом

$$u_H = \frac{4}{\pi} U_1 \sum_{n=1,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \left(1 + \sqrt{2} \cos \frac{\pi n}{2} \right) \cos n\vartheta.$$

Наиболее мощные АИН строятся с использованием незапираемых (однооперационных) тиристоров, снабженных коммутационными узлами (КУ), которые были рассмотрены в § 32.22.

В трехфазном мостовом инверторе возможны различные варианты включения КУ:

1. *Повентильные КУ.* В этом случае каждое из шести вентильных плеч мостовой схемы имеет отдельный независимый КУ. Этот вариант обеспечивает наибольшую гибкость, поскольку каждое плечо может коммутироваться независимо от остальных (что, например, позволяет осуществить однополярную ШИМ в каждой фазе). Однако он является наиболее сложным и на практике используется редко.

2. *Пофазные КУ.* Каждый КУ служит для попеременной коммутации двух вентильных плеч одной фазы мостового инвертора, т. е. число КУ сокращается до трех, а в однофазном мостовом АИН требуются два КУ.

На рис. 32.78 показана одна из часто применяемых схем АИН с пофазными КУ, причем в последних использованы принцип параллельной коммутации с колебательным перезарядом конденсатора и вынесенным из цепи силового тиристора коммутирующим дросселем L_K .

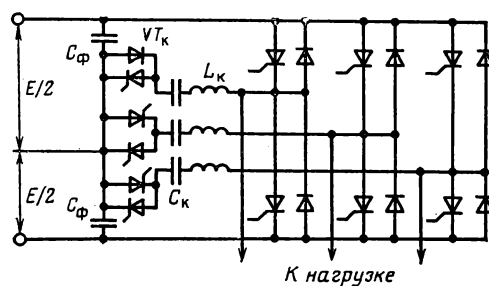


Рис. 32.78. Трехфазный мостовой АИН с пофазными коммутирующими узлами (КУ)

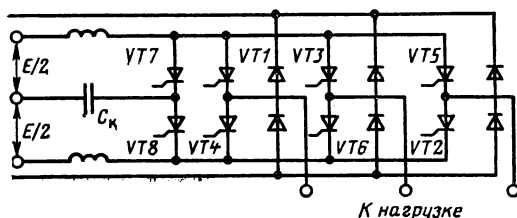


Рис. 32.79. Трехфазный мостовой АИН с групповыми КУ, основанными на принципе последовательной коммутации

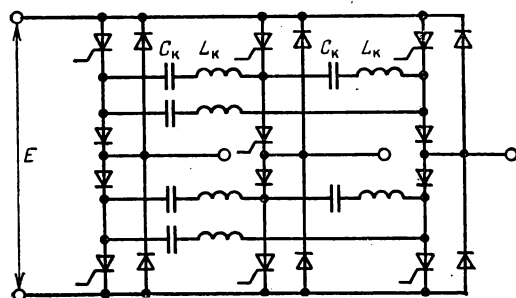


Рис. 32.80. Трехфазный мостовой АИН с отсекающими диодами и межфазными коммутационными узлами

3. *Групповые КУ.* В мостовом АИН имеют всего два КУ, один из которых используется для запираания вентилей анодной, а другой — вентилей катодной группы. На рис. 32.79 показана в качестве примера схема трехфазного АИН с групповыми КУ, имеющими общий конденсатор и основанными на принципе последовательной коммутации. В такой схеме вспомогательные тиристоры $VT7$ и $VT8$ должны отпираться попеременно, каждый с трехкратной частотой.

Все названные в пп. 1—3 способы включения КУ предполагают использование непрямой (двухступенчатой) коммутации.

4. *Межфазные КУ.* Этот вариант основан на прямой (одноступенчатой коммутации), когда запираение каждого тиристора происходит при отпирании очередного основного тиристора, а коммутирующие тиристоры отсутствуют. На рис. 32.80 показана схема подобного АИН с отсекающими диодами, иногда используемая в преобразователях частоты для частотно-управляемого асинхронного электропривода; особен-

ностью этой схемы является то, что каждый тиристор открыт в течение интервала $\lambda = 2\pi/3$.

Более подробно о выборе типа КУ и расчете его элементов см. [32.11].

32.27. ВЫХОДНЫЕ ФИЛЬТРЫ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Для улучшения гармонического состава выходного напряжения инверторов напряжения широко используются пассивные фильтры, включаемые на выходе.

Фильтр должен максимально ослаблять высшие гармоники и передавать в нагрузку основную (первую) гармонику с наименьшим ослаблением.

Г-образный полосовой фильтр (рис. 32.81, а) состоит из двух резонансных контуров: последовательного (L_1, C_1) и параллельного (L_2, C_2), каждый из которых настроен на основную гармонику (сопротивления r_1 и r_2 учитывают потери в элементах). Последовательный контур с резонансом напряжений на основной частоте имеет малое сопротивление для токов этой частоты, а параллельный контур с резонансом токов, наоборот, имеет большое сопротивление, что обеспечивает достаточный высокий коэффициент передачи по основной гармонике. В то же время для токов высоких частот за счет включения последовательно с нагрузкой дросселя L_1 и параллельно ей конденсатора C_2 коэффициент передачи оказывается небольшим.

Резонансные контуры фильтра можно характеризовать следующими основными параметрами (пренебрегая активными потерями в контуре, что обычно делается при инженерных расчетах): $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ — резонансная частота контура; $\rho = \sqrt{L/C} = \omega_0 L = 1/\omega_0 C$ — характеристическое сопротивление контура; $\Delta = \omega n / \omega_0 = \omega_0 / \omega_n = (n^2 - 1)/n$ — относительная расстройка контура для частоты n -й гармоники; $S = U_n^2 / \rho$ — установленная мощность элементов контура; $\varepsilon = S/P_n$ — относительное значение установленной мощности элементов контура; P_n — мощность нагрузки.

При расчете фильтра необходимо так распределить установленную мощность фильтра между его элементами, чтобы заданному значению суммарной установленной мощности фильтра соответствовало наибольшее ослабление высших гармоник.

Максимальное ослабление любой из высших гармоник при заданной установленной мощности фильтра $S_\Sigma = S_1 + S_2$ получается, ког-

да мощности обоих контуров фильтра равны, т. е.

$$S_1 = S_2 = \sqrt{\varepsilon} P_n.$$

тогда

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon/4 = S_1 S_2 / 4 P_n.$$

Модуль коэффициента передачи напряжения фильтра для любой гармоники

$$k_{un} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\varepsilon}{16} \Delta^2\right)^2 + \rho^2 \frac{\varepsilon^2}{16} \Delta^2}},$$

где $\rho = R_{н,ном}/R_n$ — коэффициент нагрузки ($0 < \rho \leq 1$).

При расчете фильтра необходимо, чтобы принятое значение ε было больше $\varepsilon_{рез}$, при котором наступает резонанс на самой низшей из высших гармоник выходного напряжения инвертора, т. е.

$$\varepsilon > 4n/(n^2 - 1).$$

Коэффициент гармоник k_r связан с коэффициентом передачи напряжения фильтра соотношением

$$k_r = \frac{\sqrt{\sum_{n=3,5,\dots}^{\infty} (k_{un} U_n)^2}}{k_{u1} U_1}.$$

На рис. 32.82 приведена зависимость коэффициента гармоник на выходе полосового фильтра от относительного значения установленной мощности элементов фильтра.

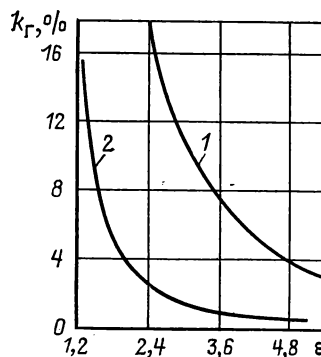


Рис. 32.82. Зависимость коэффициента гармоник на выходе фильтра от относительной расстройки ε : 1 — для однофазного инвертора; 2 — для трехфазного инвертора

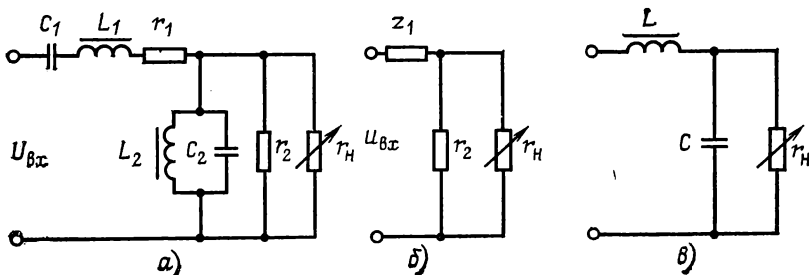


Рис. 32.81. Принципиальные схемы фильтров инверторов напряжения:

а — Г-образный полосовой фильтр; б — Г-образный режекторный фильтр; в — Г-образный LC-фильтр

Полосовой фильтр имеет значительную установленную мощность, его коэффициент передачи напряжения зависит от характера нагрузки, поэтому в некоторых случаях применяют режекторный (заградительный) фильтр, представляющий собой последовательный резонансный контур, настроенный на частоту основной гармоники выходного напряжения инвертора, и включаемый последовательно с нагрузкой. Шунтирование нагрузки конденсатором C_2 создает цепь для замыкания токов высших гармоник.

Коэффициент передачи напряжения по основной гармонике фильтра близок к единице: $k_{u1} \approx 1$, а коэффициент передачи напряжения фильтра для высших гармоник

$$k_{un} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (n^2 - 1)}{1 + \varepsilon_2^2}\right]^2 + p^2 \frac{\varepsilon_1^2 \Delta^2}{(1 + \varepsilon_2)^2}}},$$

где $\varepsilon_2 = Q_2/P_H$ — относительная установленная мощность шунтирующего конденсатора;

$$Q_2 = U_H^2 \omega_1 C_2.$$

Минимальное ослабление фильтром высших гармоник будет в режиме холостого хода ($p=0$):

$$k_{un} = \frac{1}{1 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{n^2 - 1}{1 + \varepsilon_2^2}}.$$

На n -й гармонике возникает резонанс, если $\varepsilon_1 \varepsilon_2 (n^2 - 1)/(1 + \varepsilon_2^2) = 1$.

Условие оптимального распределения установленной мощности элементов фильтра:

$$\varepsilon_2^2 + 2\varepsilon_2/\varepsilon - 1 = 0,$$

где $\varepsilon = 2\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ — относительное значение суммарной мощности всего фильтра.

При этом оптимальная зависимость между относительными значениями установленной мощности шунтирующего конденсатора и суммарной мощности всего фильтра.

$$\varepsilon_{2\text{опт}} = \frac{\sqrt{\varepsilon^2 + 1} - 1}{\varepsilon};$$

обычно $\varepsilon_{2\text{опт}} = 0,68 \div 0,78$.

Если преобразователь используется в качестве вторичного источника питания, то $\varepsilon_2 \leq 0,5$. При этом установленная мощность режекторного фильтра приблизительно в 1,33 раза меньше, чем полосового фильтра. На рис. 32.83 приведены зависимости коэффициента гармоник на выходе Г-образного полосового фильтра от угла $\theta = \omega_1 t_n$ при различных значениях ε для однофазного мостового инвертора в режиме холостого хода.

Индуктивно-емкостный однозвенный фильтр (LC-фильтр, рис. 32.81, а) является наиболее простым типом фильтра. Относительные значения установленных мощностей элементов

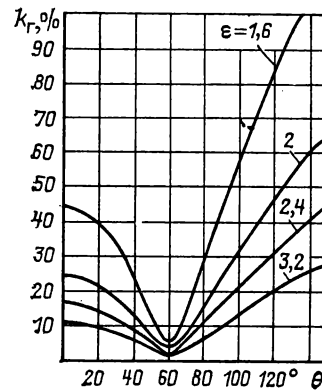


Рис. 32.83. Зависимость коэффициента гармоник на выходе Г-образного режекторного фильтра от угла θ при различных значениях расстройки ε для однофазного мостового инвертора ($p=0$)

фильтров, если пренебрегать потерями в элементах фильтра:

$$\varepsilon_2 = U_{\text{вых}}^2 \omega_1 C_2 / P_H^2 = R_H \omega_1 C_2;$$

$$\varepsilon_1 = \left[(1 + \varepsilon_2)^2 + \varepsilon_2^2 \right] \omega_1 L_1 / R_H.$$

Модуль коэффициента передачи напряжения фильтра

$$k_{un} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{n^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{1 + \varepsilon_2^2}\right)^2 + \left(\frac{n \varepsilon_1 p}{1 + \varepsilon_2}\right)^2}}.$$

Так же как в полосовом и режекторном фильтрах, в LC-фильтре минимальное значение коэффициента гармоник k_r соответствует режиму холостого хода ($p=0$), а потери в фильтре не влияют на форму выходного напряжения.

Оптимальное с точки зрения получения минимального коэффициента гармоник k_r соотношение между установленными мощностями последовательного и параллельного элементов фильтра при $p=0$ является $\varepsilon_{2\text{опт}} = 1$.

Условие резонанса в LC-фильтре в режиме холостого хода ($p=0$):

$$(1 + \varepsilon_2^2)/\varepsilon_1 \varepsilon_2 = n^2.$$

С учетом $\varepsilon_{2\text{опт}} = 1$ получаем значение ε_1 , при котором возможен резонанс $\varepsilon_1 = 2/n^2$. Г-образный индуктивно-емкостный фильтр может войти в резонанс на частоте основной гармоники напряжения, если $\varepsilon_1 = 2$, а $\varepsilon_2 = 1$, в то время как полосовой фильтр и режекторный фильтр этим свойством не обладают. Возможность резонанса в LC-фильтре на основной частоте приводит к резкой зависимости выходного напряжения, что является недостатком этого фильтра. Установленная мощность LC-фильтра меньше при равных условиях, чем полосового и режекторного фильтров. Внешняя характеристика фильтра делает целесообразным его применение в случае мало изменяющейся нагрузки.

Общим недостатком выходных фильтров по рис. 32.81 является большая установленная

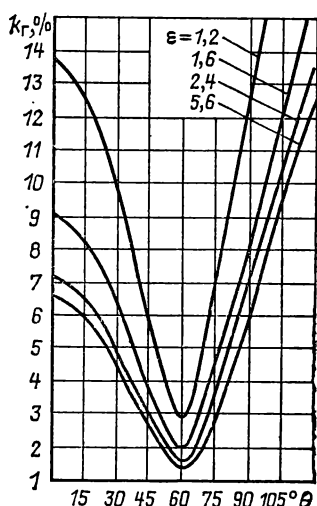


Рис. 32.84. Зависимость коэффициента гармоник на выходе Г-образного фильтра от угла θ при различных значениях расстройки ϵ для однофазного мостового инвертора ($p=0$)

мощность элементов, а следовательно, большие габариты и масса.

На рис. 32.84 приведены зависимости коэффициента гармоник на выходе Г-образного LC-фильтра от угла θ при различных значениях ϵ для однофазного мостового инвертора в режиме холостого хода.

32.28. АВТОНОМНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ИНВЕРТОРЫ

Резонансные АИ (АИР) могут быть разделены на две подгруппы в зависимости от отсутствия или наличия диодов, включенных встречно-параллельно тиристорам в плечах вентильного коммутатора (называемых обычно «обратными» диодами). Эти две подгруппы различаются своими характеристиками, причем возможно их дальнейшее деление в зависимости от способа подключения конденсаторов и дросселей относительно нагрузки, вентильного коммутатора и источника питания. Однако характерной особенностью всех инверторов данного типа является колебательный характер кривой выходного тока тиристоров в течение каждого рабочего полупериода, в результате чего запирающие тиристоры происходит за счет спада этого тока к нулю (т.е. без коммутации тока на другой управляемый вентиль). Такой характер процессов обусловлен резонансными свойствами цепи анодного тока, состоящей из специально введенных в схему инвертора емкостей и индуктивностей и элементов схемы нагрузки.

На рис. 32.85,а показана в качестве примера однофазная схема мостового АИР без обратных диодов. В общем случае параллельно нагрузке включен компенсирующий конденсатор C_1 , а последовательно с ними включен конденсатор C_2 , обеспечивающий вместе с суммарной индуктивностью $L=L_1+L_2$ колебательный процесс в выходной диагонали вентильного моста. На практике возможна рабо-

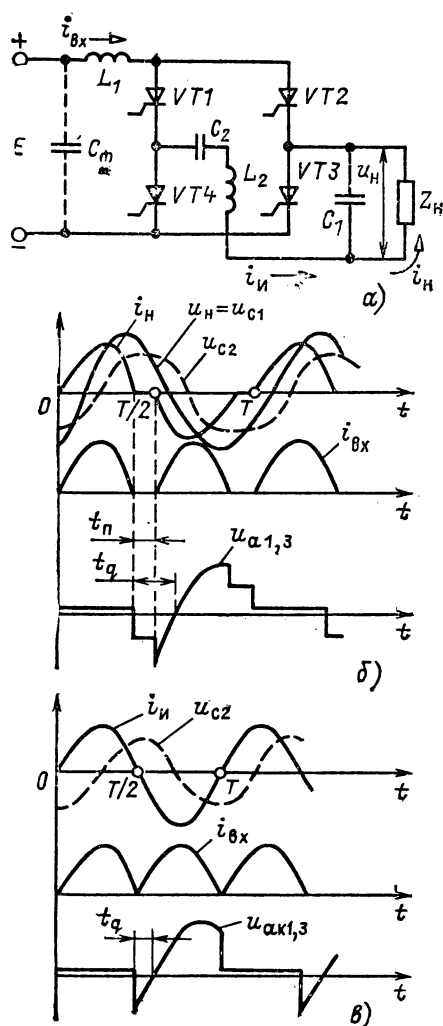


Рис. 32.85. Схема мостового резонансного инвертора без обратных диодов (а) и кривые токов и напряжений в режиме с паузой (б) и в граничном режиме (в)

та инвертора без C_2 (т.е. при $C_2=\infty$, тогда C_1 должен обеспечить некоторую перекомпенсацию нагрузки), либо без C_1 (т.е. при $C_1=0$, тогда активная составляющая сопротивления нагрузки должна быть небольшой, чтобы не вносить в LC-контур большого затухания).

Индуктивность, обеспечивающая колебательный характер тока в цепи АИР, на рис. 32.85,а показана разделенной на две части L_1 и L_2 , которые включены соответственно на стороне переменного и постоянного тока. Нагрузка Z_H иногда вместе с конденсатором C_1 может быть включена через согласующий трансформатор.

Значение суммарной индуктивности $L=L_1+L_2$ и емкости конденсаторов C_1 и C_2 выбираются так, чтобы при всех возможных соотношениях эквивалентного активного сопротивления R_H и индуктивности L_H нагрузки резонансная частота цепи, образующейся при одновременном отпирании тиристоров $VT1$ и

VT3 или VT2 и VT4, была несколько выше (или в предельном случае равна) частоты управляющих импульсов. В этом случае, который показан на рис. 32.85,б, ток через соответствующую пару тиристоров спадает к нулю до момента отпирания очередной пары. Длительность паузы между полуволнами тока равна

$$t_{\pi} = \frac{T - T_0}{2} = 4\pi(1/\omega - 1/\omega_0),$$

где T и ω — период и угловая частота управляющих импульсов, задаваемые системой уравнения; T_0 и ω_0 — период и угловая резонансная частота контура. Обычно $t_{\pi} = (0,1 \div 0,2)T/2$.

Несмотря на наличие паузы, кривая напряжения на нагрузке u_n благодаря конденсатору C_1 близка к синусоидальной.

Если принять, что конденсатор C_1 обеспечивает полную компенсацию нагрузки, т.е. цепь C_1, Z_n может быть представлена эквивалентным активным сопротивлением $R_s \approx R_n$, собственная частота контура АИР равна

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC_2} - \left(\frac{R'_s}{2L}\right)^2},$$

где $R'_s = R_s/n_{\text{тр}}^2$ — приведенное эквивалентное сопротивление нагрузки (при наличии трансформатора); $L = L_1 + L_2$.

При этом необходимо, чтобы

$$R'_s < 2\sqrt{L/C_2}.$$

Из кривой напряжения между анодом и катодом тиристоров ($u_{a1,3}$, рис. 32.85,б) видно, что время t_0 , предоставляемое для восстановления запирающих свойств, превышает длительность паузы t_{π} . Это обусловлено наличием индуктивности L_1 в цепи постоянного тока, так как при отпирании следующей пары тиристоров нарастающий ток $i_{\text{вх}}$ создает на этой индуктивности ЭДС самоиндукции, которая вызывает дополнительный скачок обратного напряжения. Такое увеличение t_0 позволяет применять данный АИР на сравнительно высоких частотах. Скачок обратного напряжения и добавка к времени t_{π} зависят от соотношения индуктивностей L_1 и L_2 . Обычно выбирают $L_1/L_2 = 0,3 \div 0,5$, так как при слишком большой L_1 возрастают амплитудные значения прямого и обратного напряжений на тиристорах.

Приведенные выше соотношения справедливы также для чисто последовательного инвертора, когда $C_1 = 0$ и $L = L_1 + L_2 + L_n$ (при допущении, что нагрузка представлена последовательным соединением активного и индуктивного сопротивлений).

Для получения в АИР на тиристорах обратного напряжения на интервале t_{π} (рис. 32.85,б) необходимо, чтобы конденсатор C_2 зарядился к концу импульса тока до напряжения, превышающего E . В установившемся режиме амплитудное напряжение на конденсаторе в этом случае равно

$$U_{C2\text{max}} = E \frac{1 + e^{-\pi/2Q}}{1 - e^{-\pi/2Q}},$$

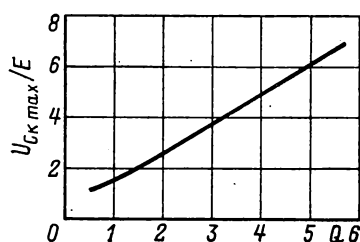


Рис. 32.86. Зависимость напряжения на последовательном конденсаторе от добротности контура

где $Q = \omega_0 L / R_n$ — добротность колебательного контура. На рис. 32.86 построена зависимость $U_{C2\text{max}} = f(Q)$. На практике обычно $Q = 1,5 \div 3$, а при питании от низковольтных источников (при $E \leq 100$ В) возможны и большие значения $Q = 3 \div 5$.

На рис. 32.85,в показаны диаграммы токов и напряжений при работе последовательно-параллельного или последовательного инвертора в граничном режиме, т.е. при $\omega_0 = \omega$ и $t_{\pi} = 0$. Такой режим возможен только при наличии индуктивности L_1 .

Следует заметить, что при $L_2 = 0$ (т.е. когда вся индуктивность сосредоточена на стороне постоянного тока) и при $\omega_0 < \omega$ входной ток $i_{\text{вх}}$ получается непрерывным. Такой режим работы рассматриваемой схемы следует считать характерным уже не для резонансного инвертора, а для инвертора тока (см. § 32.26),

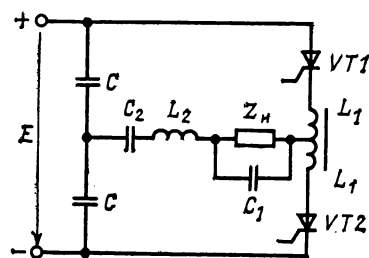


Рис. 32.87. Полумостовая схема резонансного инвертора

особенно если L_1 велика и пульсации входного тока малы.

Кроме показанной на рис. 32.85,а мостовой схемы, АИР может быть также выполнен по полумостовой схеме (рис. 32.87). Конденсаторы C могут быть фильтровыми и одновременно служить для создания нулевой точки источника питания (в этом случае необходимо, чтобы их емкость была достаточно велика) либо могут использоваться как последовательная емкость колебательного контура (тогда необходим отдельный фильтровый конденсатор в цепи постоянного тока). В последнем случае их можно считать включенными для переменных составляющих тока параллельно, тогда отдельный конденсатор C_2 не нужен и следует считать $C_2 = 2C$.

Из рассмотрения процессов в АИР следует, что они обладают следующими особенностями:

а) кривая тока через тиристоры имеет форму полусинусоидальных импульсов, поэто-

му скорость изменения тока при включении или перед выключением тиристоров определяется в первом приближении собственной частотой резонансного контура ω_0 и амплитудным значением тока I_{am} :

$$\left| \frac{di_a}{dt} \right|_{\text{вкл}} \approx \left| \frac{di_a}{dt} \right|_{\text{выкл}} \approx \frac{6I_{am}}{I_0} = \frac{3\omega_0 I_{am}}{\pi}.$$

Поэтому даже при сравнительно высоких частотах di/dt может быть сравнительно небольшой; например, при $f_0=10$ кГц и $I_{am}=500$ А $di/dt=30$ А/мкс;

б) скорость изменения напряжения на тиристорах при переходе от обратного к прямому напряжению также сравнительно невелика (в этом отношении АИР подобны инверторам тока);

в) время, предоставляемое для восстановления управляемости тиристоры, может быть при необходимости сравнительно большим за счет паузы между импульсами тока и выбора правильного соотношения между L_1 и L_2 (см. рис. 32.85,б).

Указанные выше особенности полезны при использовании АИР на повышенных частотах (свыше 1 кГц). В то же время следует отметить, что именно при частотах порядка нескольких килогерц массогабаритные показатели конденсаторов и реакторов, специально введенных в состав АИР для получения требуемого характера изменения тока, получаются относительно небольшими. Поэтому область предпочтительного использования АИР лежит в диапазоне свыше 0,5—1 кГц.

К числу недостатков АИР относятся падающая внешняя характеристика и зависимость времени t_q от параметров нагрузки, особенно заметная в чисто последовательном или чисто параллельном инверторе.

Существенное ослабление указанных недостатков достигается в АИР с обратными диодами. Мостовая схема такого инвертора при наличии последовательного и параллельного конденсаторов приведена на рис. 32.88,а.

На рис. 32.88,б показаны кривые выходного i_n и входного $i_{вх}$ токов вентильного коммутатора, а также кривая напряжения на нагрузке u_n и напряжения на тиристорах в режиме «без паузы» (называемом иногда режимом непрерывного тока) такого инвертора. При работе в таком режиме очередная пара тиристоров отпирается до спада к нулю тока через обратные диоды противофазных плеч. Например, когда на первом полупериоде ($0 < t < T/2$) ток проходил через тиристоры $VT1$ и $VT3$ и затем перешел на диоды $VD1$ и $VD3$, в момент $t=T/2$ отпираем тиристоры $VT2$ и $VT4$, и ток через диоды мгновенно прекращается. В кривой тока $i_{вх}$ в моменты $T/2$, T и т.д. имеют место скачки от отрицательных к положительным значениям. На практике для снижения скорости нарастания тока через тиристоры или их отпираний в цепь обратных диодов включают небольшие реакторы, тогда спад тока через диоды и нарастание тока через тиристоры происходят с некоторыми перекрытиями.

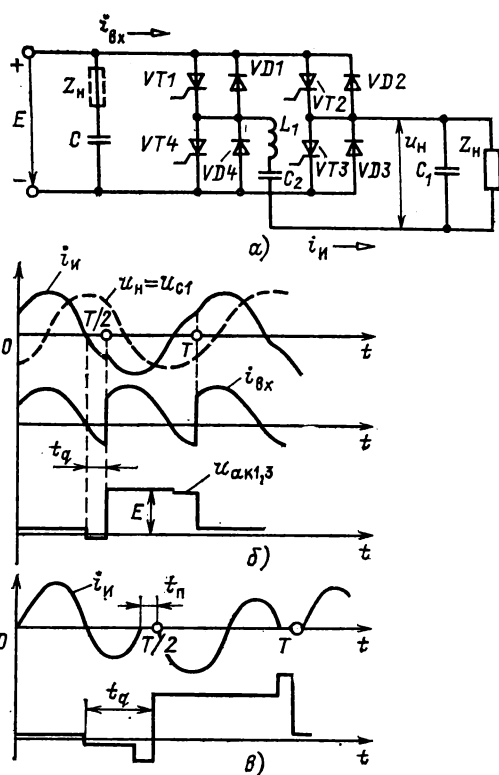


Рис. 32.88. Мостовая схема резонансного инвертора с обратными диодами (а), графики токов и напряжений в режиме без паузы (б) и в режиме с паузой (в)

Из кривой u_a видно, что время t_q соответствует времени прохождения тока через обратные диоды, причем на этом интервале обратное напряжение на тиристорах близко к нулю (оно составляет 1—2 В), а прямое напряжение по окончании интервала t_q нарастает скачком. Последние два обстоятельства свидетельствуют о достаточно трудном режиме работы тиристоры в данной схеме.

Ток i_n и напряжение u_a для режима «с паузой» показаны на рис. 32.88,в. В этом случае ток через обратные диоды успевает в течение полупериода спадать до нуля. Длительность паузы t_n определяется приближенным выражением

$$t_n = T/2 - T_0 = \pi(1/\omega - 2/\omega_0)$$

(обозначения здесь те же, что и для схемы рис. 32.85,а).

В этом режиме скорость нарастания тока через тиристоры при отпирании существенно меньше, а длительность интервала t_q при той же частоте управления $f=1/T$ больше (рис. 32.88,в внизу). Однако такой режим характеризуется резко несинусоидальной кривой выходного тока ВК, в результате чего и кривая u_n получается более искаженной.

Преимуществом АИР с обратными диодами является более жесткая внешняя характеристика, чем у инвертора без таких диодов. Однако, как указывалось, режим работы

тириستоров в таких инверторах тяжелее, в связи с чем необходимо либо работать при более низких частотах, либо использовать тиристоры с меньшим временем t_a и более высокими допустимыми значениями di/dt (для режима без паузы) и du/dt .

На схеме с обратными диодами основан АИР с удвоением частоты. В таком АИР нагрузку включают не в диагональ переменного тока ВК, а параллельно его входу — Z_n (показано пунктиром на рис. 32.88, а). В этом случае конденсатор C является не фильтровым, а разделительным (для исключения постоянной составляющей тока через Z_n). Через нагрузку в такой схеме замыкается переменная составляющая входного тока ВК $i_{вх}$, в связи с чем частота основной гармоники тока нагрузки и напряжения на нагрузке в 2 раза выше, чем частота работы тириستоров. Для улучшения кривой u_n параллельно ей обычно включается конденсатор C_1 .

32.29. ЗАРЯДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ

Для получения мощных импульсов тока широко используются емкостные накопители энергии, т. е. конденсаторные батареи, заряжаемые до требуемого высокого напряжения (от нескольких до сотни киловольт) от специального зарядного устройства и, в частности, преобразователя. В качестве такого зарядного преобразователя может быть использован резонансный последовательный инвертор с обратными диодами (рис. 32.89, а).

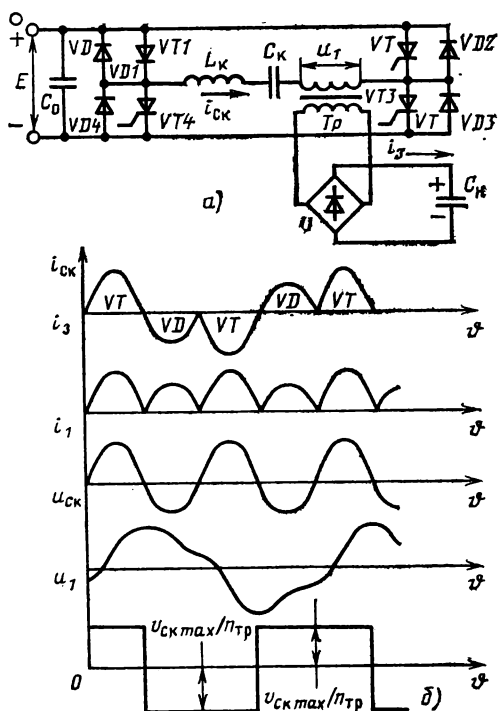


Рис. 32.89. Схема преобразователя для заряда конденсаторной батареи C_n основанная на АИР с обратными диодами (а) и графики токов и напряжений (б)

При заряде конденсаторной батареи необходимо ограничить амплитуду зарядного тока, что автоматически осуществляется в последовательном резонансном инверторе, который является по отношению к нагрузке емкости C_n , включенной через трансформатор Tr и вентильный мост BM , источником тока. Для предотвращения накопления энергии в коммутирующем конденсаторе C_k силовые тиристоры зашунтированы обратными диодами $VD1—VD4$. При включении тириستоров $VT1, VT3$ (или $VT2, VT4$) контур $L_k—C_k—Tr$ подключается к источнику постоянного напряжения E и через него протекает полуволна синусоидального тока $i_{ск}$ (рис. 32.89, б). Конденсатор C_k заряжается до напряжения $U_{ск\max} > E$. Через заряженный конденсатор C_n протекает импульс зарядного тока i_3 .

В момент $\phi = \phi_1$ ток тиристоров падает до нуля, и отпираются обратные диоды $VD1, VD3$, через которые конденсатор C_k разряжается, отдавая энергию частично в источник питания E и частично в нагрузку C_n . При питании от выпрямителя вход инвертора шунтируется конденсатором C_0 . В момент $\phi = \pi$ включаются тиристоры $VT2, VT4$, и процессы в схеме повторяются.

Таким образом осуществляется заряд конденсаторной батареи C_n пульсирующим током i_3 , имеющим форму полуволн синусоиды. Такой режим обеспечивает высокий КПД зарядной цепи (80—90 %) и отсутствие токовых перегрузок элементов силовой схемы. Кроме того, в течение всего процесса заряда обеспечивается неизменное время t_q , предоставляемое тиристорам для восстановления запирающих свойств, равное интервалу $0... \phi_1$, т. е. приблизительно половине периода ($\phi_1 \approx \pi$) собственной частоты ω_0 колебательного контура. Преимуществом схемы является и небольшое напряжение, действующее на силовых тиристорах:

$$U_{amax} = E.$$

На практике чаще используется двухмостовой зарядный преобразователь (рис. 32.90, а), состоящий из двух идентичных резонансных последовательных инверторов, работающих с фазовым сдвигом $\phi \approx \pi$ (рис. 32.90, б). В таком преобразователе устраняется влияние тока намагничивания трансформатора на работу инвертора, так как благодаря последовательному включению вентильных мостов $U1, U2$ на интервале работы обратных мостов соответствующий выпрямительный мост оказывается «стянутым в точку» (все его диоды проводят ток), поэтому на этом интервале соответствующий инвертор работает в режиме короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора. Поэтому нарастающее в процессе заряда напряжение на батарее конденсаторов i_n не влияет на работу схемы. Такой режим обеспечивает незначительное изменение амплитуды тока тиристоров в процессе заряда, однонаправленность тока, потребляемого от источника питания, и небольшое изменение тока i_3 , заряжающего конденсаторную батарею.

Для обеспечения заряда конденсаторной батареи C_n за заданное время t_3 до напряжения U_{c0} необходимо, чтобы среднее значение зарядного тока

$$I_3 = C_n U_{c0} / t_3.$$

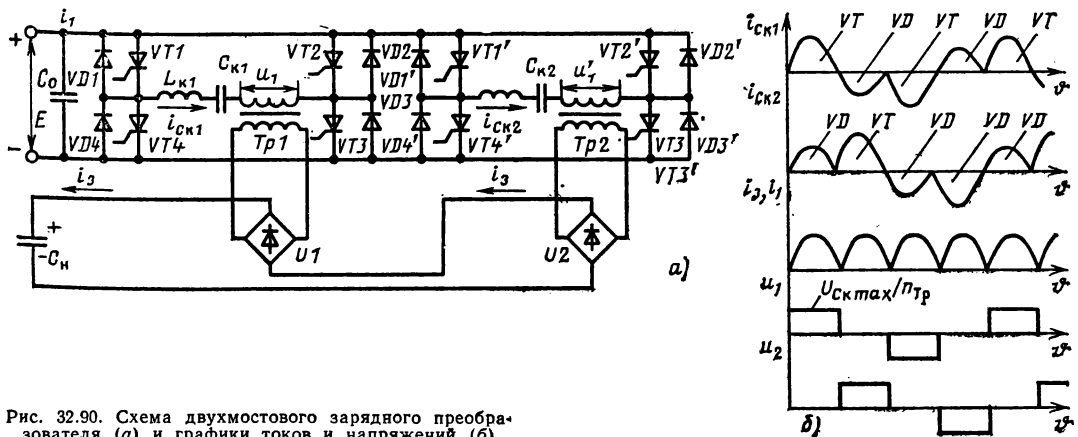


Рис. 32.90. Схема двухмостового зарядного преобразователя (а) и графики токов и напряжений (б)

Для выполнения этого условия необходима емкость C_K коммутирующих конденсаторов:

$$C_K = \frac{n_{TP}^2 C_H U_{C0} (1 + e^{-\pi/Q})}{f_0 t_a [4En_{TP} - U_{C0}(1 - e^{-\pi/2Q})] \times (1 + e^{-\pi/2Q})},$$

где f_0 — частота резонансного контура (обычно выбирается $f_0 = 2 \div 4$ кГц); $Q = \omega_0 L_K / R$ — добротность резонансного контура (для получения высокого КПД выбирают $Q = 5 \div 10$); n_{TP} — коэффициент трансформации инверторного трансформатора.

Коэффициент трансформации выбирается таким образом, чтобы в течение всего процесса заряда обратные диоды могли проводить ток. Для этого необходимо выполнение следующего условия:

$$n_{TP} \geq \frac{U_{C0}}{E} \frac{1 + e^{-\pi/2Q}}{2e^{-\pi/2Q}}.$$

Индуктивность L_K колебательного контура должна составлять:

$$L_K = \frac{Q^2}{(4Q^2 + 1)(\pi f_0)^2 C_K}.$$

Для получения выбранной добротности Q необходимо, чтобы эквивалентное сопротивление потерь R , пересчитанное на инверторную сторону трансформатора:

$$R \leq 2\pi f_0 L_K / Q.$$

Для выбора вентиля инвертора необходимо знать наибольшее амплитудное I_{am} и среднее I_a значения тока тиристоров и диодов

$$I_{aTm} = \frac{E e^{-\Phi_1/2Q} \sin \Phi_1}{\pi f_0 L_K (1 + e^{-\pi/Q})};$$

$$I_{aDm} = \frac{E e^{-(\pi + \Phi_1)/2Q} \sin \Phi_1}{\pi f_0 L_K (1 + e^{-\pi/Q})},$$

где $\Phi_1 = \arctg 2Q$.

$$I_{aT} = f_0 C_K E \frac{1 + e^{-\pi/2Q}}{1 + e^{-\pi/Q}};$$

$$I_{aD} = f_0 C_K E e^{-\pi/2Q} \frac{1 + e^{-\pi/2Q}}{1 + e^{-\pi/Q}}.$$

Диоды высоковольтного выпрямителя выбираются на обратное напряжение $U_{обр \max} = U_{C0}$ и средний ток $I_a = 0.75 I_a$.

Инверторные трансформаторы рассчитываются как импульсные трансформаторы с длительностью импульса $t_n = T_0/2$ и амплитудой напряжения $U_2 = U_{C0}$. Действующие значения токов первичной I_1 и вторичной I_2 обмоток определяются как

$$I_1 = n_{TP} I_2 = E \sqrt{\frac{2f_0 C_K (1 - e^{-\pi/Q})}{R (1 + e^{-\pi/Q})}}.$$

Повышение мощности зарядного преобразователя целесообразно осуществлять за счет использования нескольких (N) преобразователей, каждый из которых выполнен по схеме рис. 32.90, а. При этом преобразователи включаются параллельно как по входу, так и по выходу. Управление каждым преобразователем, состоящим из двух инверторных мостов, осуществляется с фазовым сдвигом $\Phi = \pi/2N$. Такой способ включения преобразователей позволяет не только повысить общую мощность устройства в N раз, но и улучшить форму (уменьшить пульсации) как тока заряда, так и потребляемого тока от источника, что приводит к повышению общего КПД.

32.30. ЗАЩИТА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

На вентили в преобразовательных установках действуют сетевые и схемные перенапряжения неповторяющегося и повторяющегося характера. Сетевые перенапряжения вызываются действием сетевой коммутационной аппаратуры или атмосферными явлениями. Схемные перенапряжения неповторяющегося характера вызываются действием коммутационной аппаратуры схемы преобразователя. Схемные повторяющиеся перенапряжения связаны с работой вентиля в силовой схеме пре-

образователя, которые характеризуются крутым фронтом и значительной амплитудой.

Превышение допустимого напряжения на закрытом вентиле приводит к тепловому пробую. Приложение прямого напряжения с крутым фронтом вызывает включение тиристора при напряжении, меньшем, чем при нормальном режиме, и может привести к повреждению прибора за счет перегрева структуры. Появление обратного напряжения с крутым фронтом во время протекания прямого тока также приводит к повреждению прибора.

Так как появление перенапряжений в схемах преобразователей неизбежно, то для диодов и тиристорov необходимо предусмотреть специальные защитные устройства.

Влияние перенапряжений под действием внешней ЭДС ограничивается индуктивностями рассеяния обмоток трансформатора преобразователя. Если трансформатор в преобразователе отсутствует, то для уменьшения влияния внешней ЭДС включаются фазные реакторы.

Для защиты диодов и тиристорov от сетевых и схемных перенапряжений в схемах преобразователей используются RC -цепи. Один из вариантов включения защитного устройства — это включение RC -цепи параллельно каждому вентилю (рис. 32.91, а). В этом случае ограничиваются амплитуда перенапряжений и величина du/dt .

При последовательном включении RC -цепи одновременно обеспечивают равномерное деление приложенного напряжения.

В случае параллельного соединения вентилях (рис. 32.91, б) индуктивные делители L следует выбирать так, чтобы конденсаторы RC -цепи не разряжались через тиристор, включающийся первым.

Процесс включения тиристорov в схеме преобразователя вызывает появление всплеска

напряжения на других вентилях схемы. Этот всплеск ограничивается включением индуктивности последовательно с вентилями. При наличии RC -цепей, шунтирующих тиристор, роль ограничивающей индуктивности может играть реактор, включенный для уменьшения di/dt , или реакторы, используемые для деления тока между параллельными вентилями (рис. 32.91, б).

Процесс выключения вентиля имеет два этапа: первый — вентиль короткозамкнут, растет обратный ток и в индуктивности накапливается энергия. В течение второго интервала ток вентиля спадает по закону, близкому к экспоненте. Исходя из процессов, происходящих при выключении вентилях, емкость конденсаторов и сопротивление резистора RC -цепи выбирают из условий:

$$C = Q_{ост}/U_p; R < \sqrt{LC},$$

где $Q_{ост}$ — накопленный заряд в приборе в момент спадающего прямого тока до нуля (приводится в каталогах); U_p — амплитуда рабочего напряжения на вентиле.

При выключении вентиля увеличение сопротивления резистора приводит к уменьшению выброса напряжения на приборе, однако этот выброс имеет место в интервале протекания большого обратного тока, что приводит к большим потерям.

При больших сопротивлениях резистора R скорость нарастания напряжения на вентиле может быть больше скорости восстановления электрической прочности p - n -структуры.

При уменьшении R амплитуда напряжения выше, но это имеет место уже при малых обратных токах, к моменту появления этого выброса вентиляльная прочность восстановлена.

Увеличение выброса напряжения при снижении R можно снизить увеличением емкости конденсатора C . Параметры контура LRC должны быть выбраны таким образом, чтобы колебания в нем затухли к моменту следующей коммутации. Однако при включении тиристора малые значения сопротивления R приводят к росту амплитуды тока разряда конденсатора, что обуславливает предел уменьшения R .

Если оптимальные значения R для процессов включения и выключения не согласуются, используется схема RC -ячейки со вспомогательным диодом VD , где суммарные значения R для процессов включения различны (рис. 32.91, в). В схеме рис. 32.91, в рекомендуется использовать высокочастотные диоды с малым накапливаемым зарядом.

При последовательном соединении тиристорov (рис. 32.91, а), помимо RC -цепей, необходимо включать дополнительные реакторы L . При их отсутствии в случае, если один из тиристорov открылся раньше (VT_1), конденсатор C_2 будет разряжаться по контуру VT_1 — VD_2 — R_{21} — C_2 и через включившийся тиристор VT_1 пойдет большой ток.

В схемах преобразователей для защиты от коммутационных перенапряжений включаются RC -цепи на входе преобразователя между фазами переменного напряжения (рис. 32.91, д). Однако эта схема обеспечивает защиту от перенапряжений, возникающих в последовательно включенных индуктивностях, и

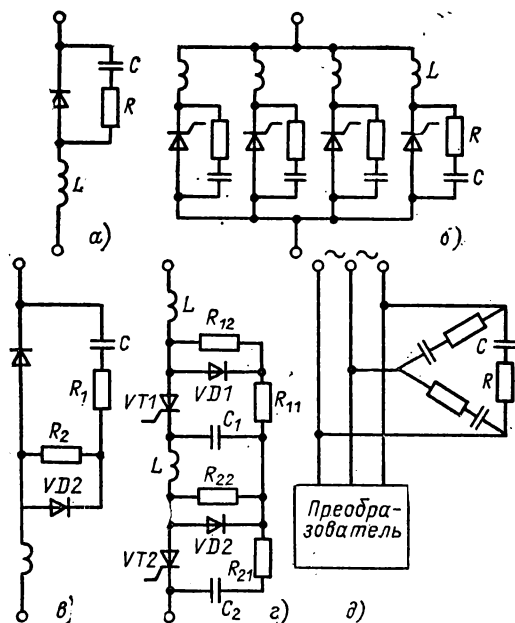


Рис. 32.91. Схемы подключения устройств для защиты от перенапряжений

не ограничивает du/dt на тиристорах в момент включения напряжения сети. Поэтому наличие RC -цепей на выходе преобразователя не исключает RC -цепей с небольшими конденсаторами параллельно каждому тиристору.

32.31. ЗАЩИТА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ ОТ АВАРИЙНЫХ ТОКОВ

Аварийные режимы преобразователей с перегрузкой вентилей по току могут быть вызваны двумя причинами: внешние аварии при коротких замыканиях в нагрузке или в распределительной сети и внутренние аварии, обусловленные повреждениями отдельных полупроводниковых приборов или нарушениями в системе управления преобразователями. Значение аварийных токов зависит от схемы преобразователя, от момента начала аварийного режима, от величины активных и индуктивных сопротивлений в схеме преобразователя.

Методика расчета аварийных режимов в схемах трехфазных преобразователей приведена в [32.24].

Защита вентилей по току выполняет разные функции в зависимости от места ее установки.

Возможны следующие варианты:

1. Включение защитного устройства в цепь переменного тока, что приводит к отключению схемы от сети при срабатывании защиты.
2. Включение защиты в цепь нагрузки с целью отключения последней или аварии.
3. Защита отключает только поврежденный вентиль.
4. Защита запирает тиристор с целью прерывания аварийного тока.

Средства защиты вентилей по току

Плавкие предохранители. Самыми простыми и дешевыми средствами защиты являются быстродействующие плавкие предохранители, которые включаются в фазы вторичных обмоток сетевого трансформатора для отключения преобразователя при внешних повреждениях и последовательно с вентилями для отключения при внутренних коротких замыканиях в цепи постоянного тока.

Для обеспечения селективного отключения повреждений характеристики предохранителей должны быть между собой согласованы.

Быстродействующие плавкие предохранители выбираются по полному интегралу отключения $W_{пр}$, который зависит от типа предохранителя и предельного отключаемого тока. Для надежности защиты полупроводниковых вентилей $W_{пр}$ должен быть меньше защитного показателя самого прибора $W_{п}$; $W_{пр} = W_{п}/k$, где k — коэффициент запаса ($k = 1,2 \div 1,5$).

Для схемы с параллельным включением вентилей минимальное число параллельно включенных приборов N , при котором обеспечивается надежная защита при внутренних

повреждениях, равно $N \geq \sqrt{k \frac{W_{пр}}{W_{п}}}$. Использование плавких предохранителей для защиты

от аварийных режимов целесообразно для преобразователей большой мощности с числом параллельно включенных вентилей больше двух. Время отключения, как правило, $t_{отк} \leq 10$ мс.

Для защиты преобразователей средней и малой мощности с помощью быстродействующих плавких предохранителей приходится снижать нагрузки на вентили, что приводит к увеличению числа приборов.

Быстродействующие бесконтактные системы токовой защиты. Осуществление быстродействующей защиты возможно при наличии высокочувствительных датчиков защиты, позволяющих определить аварийный процесс в самом начале его развития, и быстродействующих исполнительных элементов.

Для тиристорных выпрямителей, работающих на частоте свыше 200 Гц, наиболее эффективной является защита по управляющему электроду, для выпрямителей на промышленной частоте целесообразно для увеличения быстродействующих сочетать защиту по управляющему электроду с устройствами емкостного прерывания тока. Устройства бесконтактной защиты преобразователей могут быть одновременно использованы для бесконтактного включения и выключения преобразователей в рабочих режимах.

На рис. 32.92 приведена схема защиты неуправляемого мостового выпрямителя.

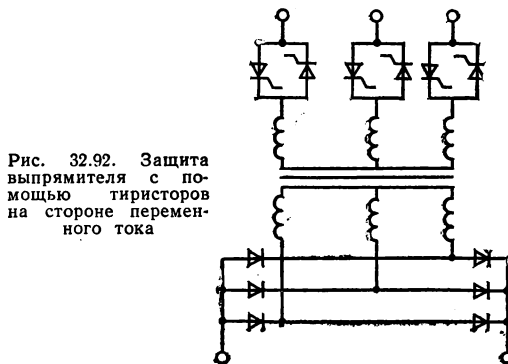


Рис. 32.92. Защита выпрямителя с помощью тиристоров на стороне переменного тока

В аварийных режимах снимаются управляющие сигналы с тиристоров, включенных встречно-параллельно во вторичные обмотки трансформатора. Продолжительность протекания тока в схеме после поступления сигнала от защиты определяется временем срабатывания системы снятия управляющих импульсов и временем снижения тока через тиристоры до нуля.

Для защиты управляемого выпрямителя от внешних и внутренних повреждений при поступлении сигнала от датчика снимаются управляющие импульсы с тиристоров схемы выпрямления. Продолжительность протекания аварийного тока зависит от отношения активного сопротивления к индуктивному в контуре короткого замыкания, так как силовые тиристоры закрываются, когда токи через них достигают нуля.

В рассматриваемых схемах защиты по управляющему электроду в качестве датчиков аварийного состояния могут быть использованы полупроводниковые, электромагнитные и дифференциальные датчики.

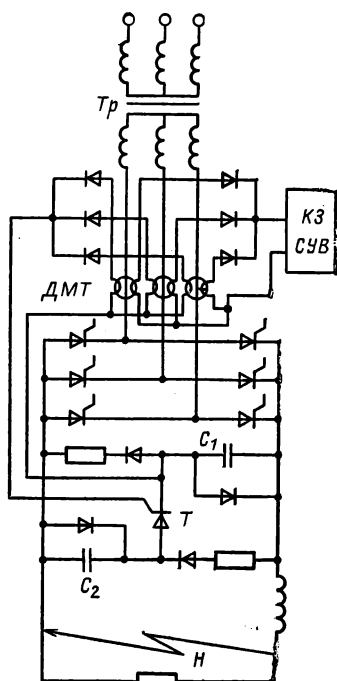


Рис. 32.93. Защита выпрямителя с помощью устройства с емкостным прерыванием тока

На рис. 32.93 приведена схема управляемого выпрямителя с емкостным прерыванием тока для отключения внешних коротких замыканий с защитой по управляющему электроду. Во всех фазах вторичной обмотки трансформатора устанавливаются импульсные датчики максимального тока ДМТ. В режиме аварийного тока в обмотке трансформатора ДМТ формирует импульсы, подаваемые на короткозамыкатель системы управления выпрямителя (КЗ СУВ), который снимает управляющие сигналы с силовых тиристоров и дает импульс управления на тиристор системы емкостного прерывания тока выпрямителя.

При открывании этого тиристора на выход тиристорного моста подается напряжение $2U_d$ с последовательно включенных предварительно заряженных конденсаторов C_1 и C_2 . Возникает ток разряда конденсаторов, направленный навстречу рабочему току. Шунтирующие их диоды предотвращают заряд конденсаторов напряжением обратной полярности. Емкость конденсаторов прерывающего устройства $C = \frac{2I_K t_1}{U_d}$, где t_1 — время, предоставляемое для коммутации тока и восстановления обратного сопротивления силовых тиристоров; I_K — ток короткого замыкания в момент срабатывания защиты; U_d — максимальное значение выпрямленного напряжения.

В случаях включения схемы на короткое замыкание или пробоя силовых тиристоров ДМТ не срабатывают и защита преобразователя производится защитой по управляющему электроду.

Датчики защиты

Быстродействующие системы защиты содержат следующие функциональные узлы:

1. Датчики защиты производят сравнение контролируемого параметра с заданной величиной и создают сигналы при наличии отклонений.
2. Устройства обработки сигналов датчиков.
3. Устройства усиления и размножения сигналов.
4. Исполнительные устройства защиты воздействуют на систему управления преобразователя либо осуществляют воздействие на силовые исполнительные устройства защиты.
5. Силовые исполнительные устройства защиты осуществляют коммутацию тока из силовой цепи преобразователя в цепь защиты, отключение вентиля преобразователя.

Датчики максимального тока. Схема датчика максимального тока, выполненная на трех трансформаторах тока, приведена на рис. 32.94. При аварийном токе падение напряжения на резисторе превышает напряжение стабилизации стабилитрона CT , в результате чего в цепи управляющего электрода тиристора появляется сигнал, открывающий тиристор. В цепи тиристора появляется ток, который включает схему защиты.

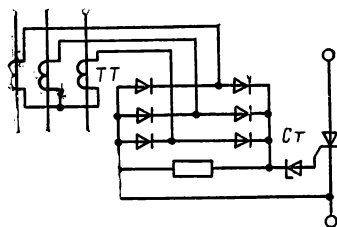


Рис. 32.94. Схема датчика максимального тока

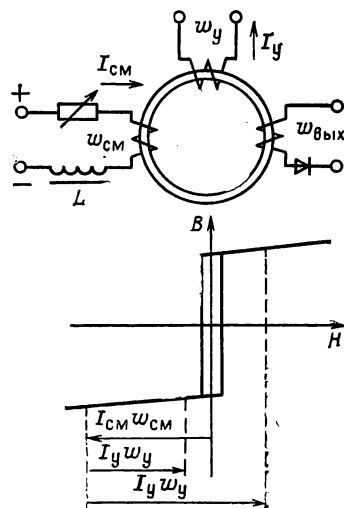


Рис. 32.95. Импульсный датчик максимального тока с использованием сердечника с прямоугольной петлей гистерезиса

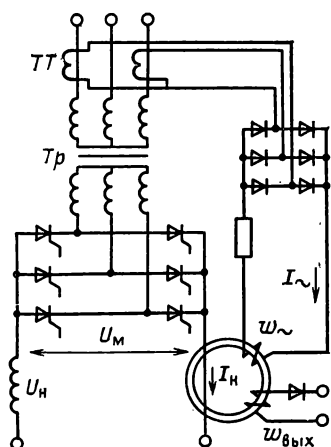


Рис. 32.96. Схема датчика дифференциальной защиты

На рис. 32.95 приведены схема импульсного датчика максимального тока и диаграммы магнитного состояния его сердечника.

Состояние сердечника зависит от соотношения МДС, создаваемых обмоткой смещения $w_{см}$ и одновитковой обмоткой управления w_y . В нормальном режиме работы преобразователя обеспечивается соотношение $I_y w_y < I_{см} w_{см}$, при котором сердечник находится в насыщенном состоянии.

В аварийном режиме $I_y w_y > I_{см} w_{см}$, сердечник перемагничивается и в выходной обмотке $w_{вых}$ появляется импульс. Реактор в цепи обмотки смещения предотвращает появление тока в этой обмотке под действием ЭДС, возникающей при перемагничивании сердечника.

Уставка импульсного датчика максимального тока регулируется в широком диапазоне путем изменения тока смещения $I_{см}$. Установка импульсных датчиков во всех фазах преобразователя приводит к максимальному быстродействию защиты.

Датчики дифференциальных защит. Датчики дифференциальных защит ДДЗ (рис. 32.96) используются для защиты при внутренних повреждениях в схемах преобразователей. Они имеют более высокие быстродействие и чувствительность, чем максимально-токовая защита. Датчик реагирует на разницу между входным и выходным токами, за счет чего датчик формирует выходной импульс в начале развития аварийного режима.

Датчик дифзащиты также выполнен на сердечнике с прямоугольной петлей гистерезиса, на котором расположены три обмотки: одновитковая, по которой протекает постоянный ток I_n , обмотка $w_{\sim}$, по которой протекает выпрямленный после трансформаторов тока ток $I_{\sim}$, пропорциональный току в обмотках силового трансформатора, и выходная обмотка $w_{вых}$.

Магнитное состояние сердечника определяется суммарным воздействием токов I_n и $I_{\sim}$.

При внутреннем коротком замыкании растет потребляемый выпрямителем ток и падает ток нагрузки, в результате чего происходит перемагничивание сердечника и в выходной об-

мотке появляется импульс выходного напряжения.

Датчики обратного тока. Датчики обратного тока применяются для защиты от внутренних коротких замыканий. Принцип работы этих датчиков аналогичен импульсным датчикам и датчикам дифференциальной защиты.

Сердечник датчика надевается на один из выводов силового вентиля. В нормальном режиме через открытый прибор протекает прямой ток. В случае пробоя через вентиль протекает обратный ток, который приводит к размагничиванию сердечника, в результате чего в выходной обмотке появляется импульс.

Для исключения ложных сигналов за счет обратных токов в рабочем режиме преобразователя на сердечник наматывается обмотка смещения $w_{см}$, МДС которой действует согласно с МДС намагничивания сердечника за счет прямого тока вентиля. Датчики обратного тока обеспечивают защиту только при пробое прибора и устанавливаются в каждое плечо схемы преобразователя.

32.32. ОХЛАЖДЕНИЕ ВЕНТИЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В диодах и тиристорах имеют место потери мощности, которые приводят к нагреву приборов, поэтому для приборов средней мощности и мощных предусматриваются специальные теплоотводящие устройства (охладители). В преобразователях наибольшее распространение имеют охладители игольчатого, штырькового и ребристого типа. Отвод теплоты от приборов осуществляется тремя видами теплообмена: конвекцией, излучением и теплопроводностью, причем все эти способы действуют одновременно.

Конвекция происходит при движении охлаждающей среды (газа или жидкости) относительно поверхности тела, причем движение охлаждающей среды может быть естественное за счет разности температур охлаждаемой поверхности и среды и вынужденное. Тепловой поток с поверхности площадью $S, м^2$, равен $P = \alpha S (T_n - T_c)$, где T_n, T_c — соответственно температура прибора в данной точке и среды, °C; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C). Коэффициент теплоотдачи зависит от способа теплообмена, геометрии прибора и охладителя, от условий обтекания поверхности охлаждающей средой. Методика расчета коэффициентов теплоотдачи для разных способов теплообмена и конструкций охладителей приведена в [32.21; 32.22]. Системы с естественным охлаждением существенно проще и надежнее, чем системы с принудительным способом, но при естественном охлаждении коэффициент теплоотдачи $\alpha = 8 \div 10$ Вт/(м²·°C), а при принудительном $\alpha = 60 \div 80$ Вт/(м²·°C), поэтому в системах с естественным охлаждением охладители выполняются с более развитыми поверхностями охлаждения. Для улучшения условий излучения поверхность радиатора окрашивается (обычно в черный цвет).

Принудительное охлаждение бывает воздушное и жидкостное. Жидкостные системы охлаждения более эффективны, так как жидкости обладают большей теплоемкостью. В качестве жидкостных теплоносителей используют

воду, трансформаторное масло, глицерин, этиловый спирт.

Задачей теплового расчета является определение температуры p - n -структуры вентильного прибора, так как основная часть тепловой энергии выделяется именно в зоне p - n -структуры.

Отвод теплоты из зоны тепловыделения к корпусу прибора определяется теплопередачей через тепловое сопротивление многослойной стенки, состоящей из кристалла, припоя и кристаллодержателя. Основная часть теплового потока, поступающего в корпус, направляется в охладитель, преодолевая при этом тепловое сопротивление контакта между корпусом и охладителем. Небольшая часть теплового потока рассеивается в окружающую среду непосредственно с поверхности корпуса и отводится от зоны p - n -структуры через гибкий силовой вывод в окружающую среду. На рис. 32.97, а приведена тепловая схема замещения полупроводникового прибора с охладителем,

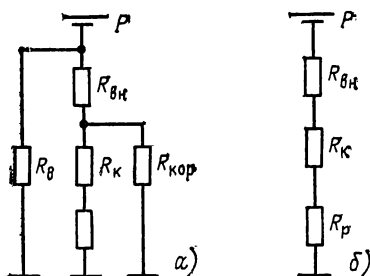


Рис. 32.97. Тепловые схемы замещения полупроводникового прибора с охладителем

Внутреннее тепловое сопротивление $R_{вн}$, °С/Вт, отражает тепловое сопротивление многослойной стенки и связано с мощностью тепловых потерь P уравнением

$$R_{вн} P = T_{p-n} - T_k,$$

где T_{p-n} —температура в зоне тепловыделения; T_k —температура корпуса.

Значение $R_{вн}$ для каждого вида приборов определяется экспериментально и дается в справочниках.

Тепловое сопротивление между корпусом прибора и поверхностью радиатора R_k зависит от характера теплоотдачи, качества обработки поверхностей, физико-механических свойств материалов и усилий в контакте. Значение R_k также определяется экспериментально.

Передача теплоты от поверхности контакта через радиатор к охлаждающей среде характеризуется тепловым сопротивлением R_p , тепловым сопротивлением гибкого силового вывода R_v и тепловым сопротивлением при передаче теплоты непосредственно с поверхности корпуса $R_{кор}$. Расчет R_p , R_v и $R_{кор}$ приводится в [32.21]. Теплоотвод непосредственно от корпуса и через гибкий вывод составляет 8—12 % расчетного количества теплоты, выделяемой в p - n -структуре, поэтому обычно эти составляющие не учитываются, а эквивалентная схема соответственно упрощается (рис. 32.97, б).

32.33. НЕКОТОРЫЕ ТИПЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ВЫПУСКАЕМЫХ В СССР

Тип	Назначение	U_d ном, В	I_d ном, А; I_d max, А	U_c , кВ	КПД	Глубина	Масса, кг	Цена, руб.	Завод-изготовитель
Выпрямители для электроприводов постоянного тока									
АТ	Питание якорных цепей электрических машин постоянного тока	230; 460	100—1000	0,2; 0,38; 6; 10	—	0—100	—	2950—11 300	ВПО «Преобразователь»
АТР	Питание якорных цепей электрических машин постоянного тока. Реверсивный	230; 460	100—1600	—	—	100—0—100	—	2860—14 300	То же
АТВ	Питание обмоток возбуждения электрических машин постоянного тока	230; 460	100—800	—	—	0—100	—	2220—6500	»
АТРВ	Питание обмоток возбуждения электрических машин постоянного тока. Реверсивный	230; 460	100—320	0,2; 0,38	—	100—0—100	—	3260—6200	»
АТРК	Питание якорных цепей и обмоток возбуждения электродвигателей постоянного тока в реверсивных приводах кранов	230; 460	100—500	0,38	0,85—0,96	100—0—100	355—980	2770—6350	»
ТЭЗ	Питание якорных цепей и обмоток возбуждения электродвигателей постоянного тока приладов буровых станков типов СБТ-250 и СБШ-320	460	16—250	0,38	0,91—0,97	0—100	365—450	3655—4030	«Электровыпрямитель»

Продолжение табл.

Тип	Назначение	U _d ном, В	I _d ном, А I _d шах, А	U _c , кЗ	КПД	Глубина	Масса, кг	Цена, руб.	Завод-изготовитель
ТЕ	Питание якорных цепей электродвигателей постоянного тока в электроприводах с однозонным регулированием То же. Реверсивные	230; 460	(141—450)	230—380 (50,65 Гц)	95	—	180—220	—	«Электровыпрямитель»
ТЕР	Питание якорных цепей электродвигателей постоянного тока	230; 460	(141—450)	230—380 (50,60 Гц)	95	—	200—240	—	»
ТП	Питание якорных цепей машин постоянного тока в схемах автоматизированного электропривода	230; 460	(720—1125)	220—440	92—95	—	400—450	—	»
ТПП 1		460; 660; 825; 1050	1600—5000	6; 10	—	—	3220—17 600	19 300—41 100	ВПО «Преобразователь»
<i>Выпрямители для возбуждения мощных электрических машин</i>									
ВУТО	Для возбуждения турбогенераторов серии ТВВ	300; 470; 480	2110; 3000	До 500 Гц	96	—	1200—1850	5900—6880	«Электровыпрямитель»
ВУТД	Для возбуждения турбогенераторов типа ТВД-120-2	300	3560 1030; 1250	До 500 Гц	97	—	1500—1700	6640	То же
ТЕ8	Питание обмотки возбуждения и управления током возбуждения синхронного двигателя	48—230	320	0,38	—	—	300—730	—	РЗНВА
<i>Выпрямители для электрифицированного транспорта</i>									
ВУК	Питание тяговых электродвигателей электропоездов переменного тока	1460—4200	1870—4800	—	98—99	—	400—660	5820—9570	«Электровыпрямитель»
ПВЭ	Для тяговых подстанций железных дорог	3300	3000	—	99	—	2100—6245	9870—12 600	То же
ВАК/ЛЕ	Питание контактных цепей городского транспорта	600	1000; 2000	6; 10	—	—	350—650	1410—2100	ВПО «Преобразователь»
УВКМ	Питание контактных цепей метрополитена	825	1600; 3200	—	—	—	960—1800	3150—5400	То же
<i>Выпрямители для электротехнологии, электрохимии, электротермии</i>									
ВАК, ВАКР, ВАКРМ, ВАК 32, ВАКД	Питание электрических гальванических ванн, гальванических цехов	12—48	100—12 500	—	79—89	—	135—9125	595—6400	БЭТЗ
	Питание ванн электролиза в электролизных производствах цветной металлургии и предприятиях химической промышленности	300—830	12 500; 25 000	6; 10; 35	—	—	1300—1450	14 800—37 000	ВПО «Преобразователь»
ТВД 1	Питание электролизов в установках получения водорода	60—230	1250; 1600	0,38; 6; 10	—	75—100	325—345	2000—2100	То же
ТЕ, ТЕР, ТВТВР	Питание электролизных ванн, станков электрохимической обработки металлов	12—48	100—1600	0,38	—	—	135—800	—	РЗНВА, БЭТЗ
ТПВ	Питание вакуумно-дуговых и плазменных сталеплавильных печей	48—825	3100—5000	6; 10	—	—	290—3200	—	ВПО «Преобразователь»
ДВ-1	Питание электролизных установок в цветной металлургии и химической промышленности с противозадис до 70 % выходного напряжения	300—830	50 000—63 000	—	—	—	82 280—131 720	84 740—102 610	То же

Выпрямители для зарядки аккумуляторных батарей

УЗА	Для зарядки тяговых аккумуляторных батарей	24—110	24—150	380—415 (50 Гц); 220—440 (60 Гц)	85—86	—	125—440	440—830	«Электропреобразователь»
ВАЗП	Для зарядки кислотных батарей	260—380	4—40	220; 380	90	—	430—845	1100—1900	«Электровыпрямитель»
ВАЗ	Для зарядки свинцовых стартерных батарей	12; 6	6	220	60—70	—	3,5	24,9	То же
ЗУК	Для зарядки батарей шахтных электровозов	120; 230	75; 155	380; 660	88; 93	—	248; 520	570; 1075	«Электропреобразователь»

Выпрямители высокого напряжения

ВРВ	Питание плазмотронов, источник питания для физических исследований	8000—14 000	480—1040	—	—	0—100	2860—5510	24 300—45 500	ТЭЗ
ИТВ	Питание генераторов высококачественной сварки, мощных радиопередающих устройств	8000—20 000	250—1500	6,3; 10,5; 15,75	99	0—100	800—5600	15 700—142 300	ВПО «Преобразователь»

Выпрямители для защиты от коррозии

ПСК	Для катодной защиты подземных металлических сооружений	12; 24; 48	12,5—104	220	60—70	—	90—200	320—620	«Электропреобразователь»
ПАСК	Для катодной защиты подземных металлических сооружений	24—96	12,5—104	220	63—68	—	90—240	460—830	То же

Выпрямители различного назначения для питания чеховых сетей, радиоаппаратуры и пр.

ВК	Питание электромагнитов и электромагнитных сепараторов	—	16—100	220—500	—	—	140—380	—	РЭНВА
ИСТ, ИСТР	Источники стабилизированного тока	48; 230	500; 2500	380	—	5—100	—	29 300	ТЭЗ
ВАС	Питание потребителей постоянного тока	15—27	300—600	380	—	—	170	—	РЭНВА
ДЕЗ	Питание силовых и оперативных цепей для динамического торможения асинхронных двигателей	115; 230	50; 315	—	—	—	250—550	970—1840	ВПО «Преобразователь»

Тип	Назначение	U_c , В	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	$I_{макс}$, А (15 мин)	КПД, %	Масса, кг	Цена, руб.	Изготовитель
Агрегаты выпрямительно-инверторные									
ВИП	Для питания и рекуперативного торможения тяговых электродвигателей электровозов переменного тока серии ВЛ-80Р	1230	1250	1760	3100	98	1700	57 400	«Электровыпрямитель»
ВИПЭ	Для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог	—	3300 выпрямительный режим 3200—3800 инверторный	2500 выпрямительный режим 1600 инверторный	2400 инверторный	99	7000	41 000	ТЭЗ

Продолжение табл.

Инверторы

Тип	Назначение	$U_c, В$	$U_{вых}, В$	$I_{вых}, А$	$I_{вых}, Гц$	КПД, %	Масса, кг	Цена, руб	Изготовитель
ИП	Для преобразования постоянного тока в переменное напряжение прямоугольной формы. Для нужд народного хозяйства	110	230, 460	2—16	50 (трехфазное) 40 (однофазное)	60—73	110	519	«Преобразователь»

Продолжение табл.

Генераторы импульсов

Тип	Назначение	$U_c, В$	$P_{max}, кВт$	$I_{ном}, ср, А$	$f, кГц$	Масса, кг	Цена, руб.	Изготовитель
ШГИ	Для питания электроэрозийных копировально-пошивочных станков. Преобразователь формирует импульсный ток регулируемой амплитуды, частоты, скважности и грбенчатой формы	380	4—12,6	40—80	1—880	450—1400	2100—5510	ЗПО «Преобразователь»
ГКИ	Для питания электроэрозийных станков	380	1,3—3,0	250; 300	8—200	170—300	1340—400	То же

Продолжение табл.

Регуляторы тиристорные

Тип	Назначение	$U_c, В$	$I_{ном}, А$	Диапазон изменения выходного напряжения, %	КПД, %	Диапазон изменения уставок тока ограничения	Масса, кг	Цена, руб.	Изготовитель
РСТ	Регуляторы скорости. Комплексующая часть магнитных контроллеров серии ТТЗ, электроприводов переменного тока, механизмов подъема и передвижения	380	100—320	0—98	98	0,65—1,5	102—21	1264—1650	«Электровыпрямитель»
РН	Для питания переменным током активных и индуктивных нагрузок, допускающих фазовое регулирование синусоидального напряжения	220, 380	63—630	5—95	98	—	7—16	315—650	ЭПО «Преобразователь»

Продолжение табл.

Прочие преобразователи

Тип	Назначение	U_c , В	$I_{ном}$, А	Предел регулирования уставки, В	КПД, %	Масса, кг	Цена, руб.	Изготовитель
ТОНЗ	Для автоматического поддержания заданной уставки напряжения сетей освещения с лампами накаливания, лампами типа ДРЛ, люминесцентными лампами	220	63; 100	200—230	99	50	390	«Электровыпрямитель»
ТКИ	Для быстрого действия отключения нагрузки от четырехпроводной сети	380; 220	100	—	95	230—270	4400—6000	»
ТКЭ	Комплект электроснабжения кабинетов физики	220	10	$U_{вых}$ 42; 36	—	—	168—300	»

Продолжение табл.

Преобразователи частоты

Тип	Назначение	U_c , В	$U_{ном}$, В	$P_{вых}$, кВт·А	$\cos \phi$	$I_{ном}$, А	$f_{вых}$	КПД, %	Масса, кг	Цена, руб.	Изготовитель
ПЧ-3,5-3200	Для питания сменных высокооборотных асинхронных электродвигателей	220; 380; 400; 415; 440 (50; 60 Гц)	220 (трехфазное)	3,5	0,75	9,2	200—3200	80	160	1845—1955	«Электроавтоматика»
ПЧ-4-200	Для питания приводов металлорежущих станков	То же	220 (трехфазное)	4	0,7	—	5—200	85	—	1825	То же
ПЧ-4, ПЧ-10	Для питания электронного инструмента трехфазным напряжением повышенной частоты	380	36; 42; 135; 230	—	—	—	200; 400	—	160—260	820—1050	ВПО «Электропреобразователь»
ТПЧ	Для электротехнологии, электрохимии, электротермии	380	800	160—2400; пределы регулирования +25—70 %	0,9—0,92	350—4650	500—4000	90—94	1500—8300	12 250— 77 100	ТЭЗ
ТДП2	Для плавного регулирования скорости вращения асинхронных двигателей с фазным ротором мощностью 100—2000 кВт	400	—	360—720	—	—	—	96	750—1450	—	«Электровыпрямитель»
ТДЕ, ТДЕР	Для комплектования электродвигателей переменного тока, выполненных на основе асинхронных двигателей с фазным ротором, с напряжением ротора не более 350 В	380 (50; 60 Гц)	—	—	—	40—100	—	—	375—450	—	То же

Список литературы

- 32.1. Чиженко И. М., Руденко В. С., Сенько В. М. Основы преобразовательной техники. М.: Высшая школа, 1980. 422 с.
- 32.2. Справочник по преобразовательной технике/Под ред. И. М. Чиженко. Киев: Техника, 1978. 447 с.
- 32.3. Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Недошивин Р. П. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1985. 400 с.
- 32.4. Полупроводниковые выпрямители. 2-е изд., перер./Е. И. Беркович, Ф. И. Ковалев и др. — М.: Энергия, 1975. 512 с.
- 32.5. Лабунцов В. А., Ривкин Г. А., Шевченко Г. И. Автономные тиристорные инверторы. М.: Энергия, 1967. 160 с.
- 32.6. Толстов Ю. Г. Автономные инверторы тока. — М.: Энергия, 1978. 208 с.
- 32.7. Забродин Ю. С. Промышленная электроника. М.: Высшая школа, 1982. 495 с.
- 32.8. Силовая электроника. Примеры и расчеты/Ф. Чаки, И. Герман, И. Иппич и др. Пер. с англ.: М.: Энергоиздат, 1982. 384 с.
- 32.9. Стабилизированные автономные инверторы с синусоидальным выходным напряжением/Ф. И. Ковалев, Г. П. Мосткова, В. А. Чванов и др. М.: Энергия, 1972. 152 с.
- 32.10. Глазченко Т. А., Гончаренко Р. Б. Полупроводниковые преобразователи частоты в электроприводах. Л.: Энергия, 1969. 184 с.
- 32.11. Забродин Ю. С. Узлы принудительной коммутации тиристоров. М.: Энергия, 1974. 128 с.
- 32.12. Аранчий Г. В., Жемеров Г. Г., Эпштейн И. Н. Тиристорные преобразователи частоты для регулируемых электроприводов. М.: Энергия, 1968. 128 с.
- 32.13. Сандлер А. С., Гусяцкий Ю. М. Тиристорные инверторы с широтно-импульсной модуляцией для управления асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1968. 96 с.
- 32.14. Преобразователи частоты на тиристорах для управления высокоскоростными двигателями/А. С. Сандлер, Г. К. Аввакумова, А. В. Никольский и др. М.: Энергия, 1970. 80 с.
- 32.15. Шипило В. П., Булатов О. Г. Расчет полупроводниковых систем управления вентилями преобразователями. М.: Энергия, 1966. 144 с.
- 32.16. Булатов О. Г., Одынь С. В. Вентильные преобразователи на базе полностью управляемых тиристоров. Итоги науки и техники, сер. Силовая преобразовательная техника. Том 2. М.: ВИНТИ, 1979.
- 32.17. Булатов О. Г., Царенко А. И. Тиристорно-конденсаторные преобразователи. М.: Энергоиздат, 1982. 217 с.
- 32.18. Поскробков А. А., Братолюбов В. Б. Бесконтактные коммутирующие и регулирующие полупроводниковые устройства на переменном токе. М.: Энергия, 1978.
- 32.19. Мощные управляемые выпрямители для электроприводов постоянного тока/Э. М. Алтер, Г. Г. Жемеров, Н. П. Левитан, А. Г. Элькин. М.: Энергия, 1975. 208 с.
- 32.20. Шипило В. П., Сирица В. В., Булатов О. Г. Электромагнитные процессы в быстродействующем реверсивном ионном преобразователе. М.: Энергоиздат, 1963. 80 с.
- 32.21. Конструирование силовых полупроводниковых преобразовательных агрегатов/С. Р. Резинский, В. С. Лабковский, И. Х. Евзеров, И. И. Фейгельман, В. М. Венделанд. М.: Энергия, 1973. 288 с.
- 32.22. Булатов О. Г., Иванов В. С., Панфилов Д. И. Тиристорные схемы включения высокоинтенсивных источников света. М.: Энергия, 1975. 176 с.
- 32.23. ГОСТ 23414-79. Преобразователи энергии полупроводниковые. Термины и определения.
- 32.24. Глух Е. М., Зеленов В. Е. Защита полупроводниковых преобразователей. М.: Энергия, 1982. 152 с.
- 32.25. Руденко В. С., Сенько В. И., Чиженко И. М. Преобразовательная техника. Киев: Вища школа, 1978. 420 с.
- 32.26. Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов. М.: Энергия, 1969. 276 с.
- 32.27. Автономные инверторы/Ю. П. Гончаров, В. В. Ермурацкий, Э. И. Заика, А. Ю. Штейнберг. Кишинев: Штинца, 1974. 334 с.
- 32.28. Писарев А. Л., Деткин Л. П. Управление тиристорными преобразователями. М.: Энергия, 1975. 260 с.
- 32.29. Жемеров Г. Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. М.: Энергия, 1977. 280 с.
- 32.30. Быков Ю. М. Непосредственные преобразователи частоты с автономным источником энергии. М.: Энергия, 1977. 143 с.
- 32.31. Джуджи Л., Пелли Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 400 с.
- 32.32. Бирзинекс Л. В. Импульсные преобразователи постоянного тока. М.: Энергия, 1974. 252 с.
- 32.33. Рабинерсон А. А., Ашкинази Г. А. Режимы нагрузки силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1976. 296 с.
- 32.34. Ривкин Г. А. Преобразовательные устройства. М.: Энергия, 1970. 544 с.
- 32.35. Эпштейн И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока. М.: Энергоиздат, 1982. 192 с.

Раздел 33

ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА И
ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ

33.1. Общие понятия Определения и классификация химических источников тока (682). Параметры ХИТ (683)	682	33.4. Вторичные ХИТ Кислотные (свинцовые) аккумуляторы и батареи (693). Щелочные аккумуляторы и батареи (696). Воздушно-металлические аккумуляторы (699). Аккумуляторы с твердыми и расплавленными электролитами (699)	693
33.2. Первичные ХИТ Классификация первичных ХИТ (685). Первичные ХИТ с водными растворами электролитов (685). Первичные ХИТ с неводными растворами электролитов (690). Первичные ХИТ с расплавленными и твердыми электролитами (691)	685	33.5. Устройства для заряда аккумуляторов и батарей	699
33.3. Топливные элементы и электрохимические генераторы	691	33.6. Применение аккумуляторов на электрических станциях и подстанциях	700
		Список литературы	702

33.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Определение и классификация
химических источников тока

Химическими источниками тока (ХИТ) называются устройства, в которых химическая энергия активных веществ (окислителя и вос-

становителя) непосредственно превращается в электрическую энергию.

Основными составными частями ХИТ являются катод, анод и ионный проводник (электролит) между ними. На катоде происходят процессы восстановления окислителя, а на аноде — окисление восстановителя. Электролит представляет собой жидкую или твердую фазу, имеющую ионную электропроводность.

Непосредственное участие в токообразующей реакции в ХИТ принимают активные вещества. Они могут входить в состав катода, анода, электролита, а иногда хранятся вне ХИТ. Совокупность активных веществ и электролита, на основе которых создан ХИТ, называется электрохимической системой этого ХИТ.

Электрохимическая система ХИТ записывается следующим образом: (+) окислитель | электролит | восстановитель (—). Например, электрохимическая система, в которой окислителем является диоксид марганца, восстановителем — цинк и электролитом — водный раствор гидроксида калия, в тексте записывается следующим способом:



Если в состав электродов ХИТ входят проводники первого рода, не изменяющиеся в ходе реакции, то они также могут записываться при изображении электрохимической системы ХИТ. Например, электрохимическая система, в которой окислителем служит кислород, восстановителем — водород, электролитом — раствор гидроксида калия, а в состав катода и анода входит платина, записывается следующим образом:



Химические источники тока подразделяются на первичные и вторичные. Первичные ХИТ предназначены для разового непрерывного или прерывистого разряда. Первичный ХИТ, состоящий из одной электрохимической ячейки, называют гальваническим элементом или просто элементом. Если ХИТ состоит из двух и более электрически соединенных элементов, то он называется гальванической батареей. Вторичные ХИТ предназначены для многократного разряда за счет восстановления его емкости путем заряда электрическим током. Вторичный ХИТ, состоящий из одной электрохимической ячейки, называют аккумулятором, а ХИТ, состоящий из двух и более электрически соединенных аккумуляторов, — аккумуляторной батареей. Вторичные ХИТ работают поочередно в режиме разряда и заряда. При разряде аккумулятор работает как первичный ХИТ, в процессе разряда происходит превращение химической энергии активных веществ в электрическую энергию, при этом активные вещества превращаются в продукты разряда. При заряде вторичного ХИТ электрическая энергия превращается в химическую энергию активных веществ, соответственно продукты разряда регенерируются в активные вещества.

Особую группу источников тока представляют топливные элементы. Топливным элементом называется источник тока, в котором происходит преобразование химической энергии окислителя и топлива (восстановителя), непрерывно поступающих извне к электродам, в электрическую энергию. В отличие от гальванических элементов активные вещества не закладываются в топливные элементы, а хранятся вне их и подаются при работе источника тока.

Для увеличения напряжения и тока топливные элементы электрически соединяют друг с другом, при этом получают батарею топливных элементов. Для обеспечения непрерывной

работы батареи топливных элементов необходимы система подачи окислителя и топлива (восстановителя), отвод продуктов реакции и тепла. Установка, состоящая из батареи топливных элементов и обслуживающих систем (систем подачи окислителя и восстановителя, отвода продуктов реакции и тепла и др.), называется электрохимическим генератором (ЭХГ). В свою очередь ЭХГ входит в электрохимическую энергоустановку, которая, кроме ЭХГ, содержит системы хранения и обработки окислителя и восстановителя, а иногда систему преобразования напряжения и тока.

Параметры ХИТ [33.1—33.7]

Электродвижущая сила (ЭДС) ХИТ определяется термодинамическими функциями химической реакции, протекающей при разряде ХИТ (токообразующей реакции):

$$E_a = -\Delta G/nF,$$

где E_a —ЭДС; ΔG —изменение энергии Гиббса токообразующей реакции; F —96 484,56 Кл/моль—число Фарадея; n —число электронов, приходящихся на одну молекулу реагента.

Значение энергии Гиббса можно рассчитывать на основании справочных данных о стандартных значениях этой энергии и данных о давлении или активностях активных веществ и продуктов реакции. На основании термодинамических функций реакций, протекающих на катоде и аноде, можно также рассчитать равновесные потенциалы этих электродов.

Электродвижущая сила ХИТ равна разности равновесных потенциалов положительного $E_{(+)}^P$ и отрицательного $E_{(-)}^P$ электродов

$$E_a = E_{(+)}^P - E_{(-)}^P.$$

Реально устанавливающееся напряжение между выводами ХИТ при разомкнутой внешней цепи называется напряжением разомкнутой цепи

$$U_{p.c} = E_{(+)} - E_{(-)},$$

где E_{+} и E_{-} —статические или стационарные потенциалы положительного и отрицательного электродов, которые устанавливаются при отсутствии электрического тока в цепи. Статический потенциал может быть равен равновесному потенциалу электрода, если на электроде устанавливается равновесие и побочные реакции отсутствуют. В этом случае ЭДС ХИТ равна напряжению разомкнутой цепи.

Однако во многих случаях из-за побочных реакций и других причин равновесие на электроде не устанавливается, и поэтому статический потенциал отличается от равновесного. Соответственно в этом случае напряжение разомкнутой цепи не равно ЭДС ХИТ.

Поляризация и сопротивление. При разряде или заряде ХИТ потенциалы электродов изменяются вследствие поляризации. Поляри-

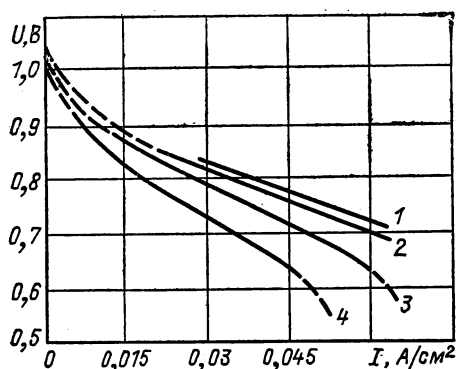


Рис. 33.1. Вольт-амперные кривые воздушно-гидразинового элемента. Температура 60 °С, концентрация КОН 9 моль/л; гидразина 0,3 моль/л (1), 0,2 моль/л (2), 0,15 моль/л (3) и 0,1 моль/л (4)

зацией называется разность между потенциалом электрода при разряде и его значением при равновесии или при стационарном состоянии. Поляризация подразделяется на концентрационную, электрохимическую и химическую.

Концентрационная поляризация возникает вследствие изменения концентрации реагирующих веществ из-за замедленности массопереноса. Концентрационная поляризация уменьшается при повышении активности или давления активных компонентов и температуры, а также при перемешивании жидких или газообразных активных веществ и продуктов реакции.

Электрохимическая поляризация возникает из-за замедленности переноса электрического заряда в электродной реакции, а химическая — из-за замедленности химических реакций на электроде. Они зависят прежде всего от природы электродной реакции и могут быть уменьшены увеличением поверхности электродов, рабочей температуры элемента, активности или давления реагирующих веществ, а также использованием каталитически активных электродов.

Сумма поляризаций катода и анода равна поляризации ХИТ.

Отношение поляризации элемента к проходящему через него току называется поляризационным сопротивлением. Поляризационные сопротивления ХИТ при разряде и заряде соответственно равны:

$$r_{п,р} = \Delta E_p / I_p, \quad r_{п,з} = \Delta E_z / I_z,$$

где $r_{п,р}$ и $r_{п,з}$ — поляризационные сопротивления разряда и заряда; ΔE_p и ΔE_z — поляризации ХИТ при разряде и заряде; I_p и I_z — токи разряда и заряда.

Поляризационное сопротивление не постоянно, оно уменьшается при увеличении тока, протекающего через ХИТ.

Кроме поляризационного, ХИТ характеризуется омическим сопротивлением, которое равно сумме омических сопротивлений электролита, электродов и других токоведущих деталей ХИТ. В отличие от поляризационного сопротивления омическое сопротивление ХИТ не зависит от тока.

Сумма омического и поляризационного сопротивлений называется внутренним сопротивлением ХИТ:

$$r_p = r_{п,р} + r_{о,р}, \quad r_z = r_{п,з} + r_{о,з},$$

где r_p и r_z — внутренние сопротивления ХИТ при разряде и заряде; $r_{о,р}$ и $r_{о,з}$ — омические сопротивления ХИТ при разряде и заряде.

Напряжение. Разрядным напряжением U_p называется напряжение между выводами ХИТ при его разряде:

$$U_p = U_{р,д} - I_p r_p.$$

Графическое изображение зависимости напряжения ХИТ от тока (внешняя характеристика) получило название вольт-амперной кривой. Она, как правило, имеет нелинейный характер, так как поляризационное сопротивление зависит от тока. Для примера на рис. 33.1 приведены вольт-амперные кривые воздушно-гидразигового элемента.

В процессе разряда изменяется состав активных веществ и электролита, поэтому изменяется и напряжение ХИТ. Графическое изображение изменения разрядного напряжения во времени при постоянном токе получило название разрядной кривой.

Различают начальное, конечное, среднее и номинальное разрядные напряжения ХИТ. Начальным напряжением ХИТ называют напряжение в начале разряда, определяемое через установленный промежуток времени. Конечным напряжением называется условное напряжение, ниже которого ХИТ считается разряженным. Средним напряжением ХИТ называется среднее арифметическое напряжений, измеренных через равные промежутки времени в течение разряда. Номинальным напряжением называют условное напряжение, характерное для электрохимической системы.

Аккумуляторы также характеризуются разрядным напряжением

$$U_z = U_{р,д} + I_z r_z.$$

При постоянном токе зарядное напряжение возрастает по мере заряда. Кривая изменения напряжения аккумулятора во времени заряда называется зарядной кривой.

Емкость и удельная емкость. Емкостью ХИТ называют количество электричества, отдаваемое им при разряде до достижения конечного напряжения. Если ХИТ разряжается неизменным током I_p , то емкость

$$C_I = I_p \tau_p,$$

где τ_p — время разряда до конечного напряжения.

Если ХИТ разряжается при постоянном сопротивлении внешней цепи R , то его емкость

$$C_R = \frac{1}{R} \int_0^{\tau_p} U d\tau \approx U_{ср} \tau_p / R,$$

где $U_{ср}$ — среднее разрядное напряжение.

Номинальной емкостью называется заряд, который должен отдавать свежизготовленный

ХИТ при нормальных условиях разряда, указанных для него. Номинальная емкость аккумулятора определяется при условии, что он был полностью заряжен.

Отношение емкости ХИТ к его объему или массе называется удельной емкостью. Емкость и удельная емкость ХИТ зависят от его конструкции, запаса активных веществ и режима разряда: тока разряда или сопротивления внешней цепи, характера разряда (прерывистый или продолжительный) и температуры окружающей среды. С увеличением тока разряда или с уменьшением сопротивления внешней цепи емкость ХИТ уменьшается, так как при этом возрастают его поляризация и омические потери. Кроме того, при высоких плотностях тока у некоторых ХИТ уменьшается степень использования активных веществ.

Кривая зависимости емкости ХИТ от температуры обычно имеет максимум. Снижение емкости ХИТ при низких температурах обусловлено увеличением поляризации и омического сопротивления; при высоких температурах ускоряются побочные химические, электрохимические и физические процессы, приводящие к потере активных веществ.

Аккумуляторы характеризуются зарядной емкостью C_z , равной количеству электричества, принимаемого ХИТ при заряде. При постоянном токе заряда зарядная емкость

$$C_z = I_z \tau_z,$$

где τ_z — время заряда.

Мощность и удельная мощность. Мощность ХИТ P равна произведению тока разряда на разрядное напряжение:

$$P = U_p I_p.$$

Так как с увеличением тока напряжение ХИТ уменьшается, то кривая зависимости мощности от тока проходит через максимум.

Удельной мощностью P_v или P_m называется отношение мощности ХИТ соответствующенно к его объему V или массе m .

Энергия и удельная энергия. Энергией ХИТ называют произведение емкости C на среднее разрядное напряжение $U_{ср}$:

$$A = U_{ср} C.$$

При одном и том же количестве активных веществ энергия ХИТ возрастает с увеличением температуры и уменьшением разрядного тока.

Отношение энергии ХИТ к его объему или массе называют удельной энергией A_v или A_m :

$$A_v = A/V, A_m = A/m.$$

Удельная энергия ХИТ уменьшается при повышении его удельной мощности.

Для аккумулятора имеет важное значение энергия, необходимая для его заряда. Отношение энергии аккумулятора, которую он отдает при разряде, к энергии A_z , необходимой для его заряда до первоначального состояния при определенных условиях, называется отдачей по энергии (КПД аккумулятора)

$$\eta_A = A/A_z.$$

Самозаряд и сохранность заряда. Потерю емкости ХИТ, обусловленную протеканием в нем самопроизвольных процессов, называют саморазрядом. Саморазряд вызывается коррозионными процессами, взаимодействием ионов переменной валентности, окислителей и восстановителей с активными веществами и т. д. Саморазряд влияет на сохранность заряда, под которой понимается способность ХИТ сохранять емкость во время хранения при разомкнутой внешней цепи.

Аккумуляторы характеризуются сроком службы, равным календарной продолжительности эксплуатации аккумуляторов в заданных условиях, определяемым промежутком времени, в течение которого аккумулятор сохраняет параметры, установленные стандартом или техническими условиями. Иногда срок службы аккумулятора выражается наработкой или техническим ресурсом. Нарботка равна числу циклов аккумулятора или батареи при испытании или эксплуатации. Технический ресурс равен числу циклов, которое должны выдержать аккумулятор или батарея при эксплуатации или испытаниях, пока его емкость не снизится до доли от номинальной, установленной в стандарте на аккумулятор или батарею конкретного типа.

Требования безопасности. В соответствии с ГОСТ [33.8] для обеспечения безопасности труда конструкция ХИТ должна исключать возможность вытекания электролитов при наклонах, толчках и вибрациях, исключать возможность накопления газов внутри источника тока до взрывоопасного состояния. Источники тока, при работе которых выделяются вещества, вредные для здоровья, выполняются герметичными. Конструкция заливочных отверстий должна исключать разбрызгивание электролита при работе.

33.2. ПЕРВИЧНЫЕ ХИТ

Классификация первичных ХИТ

По готовности к работе первичные ХИТ можно разделить на две группы:

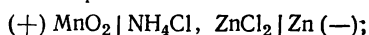
- элементы и батареи, выпускаемые в состоянии, готовом к эксплуатации;
- резервные ХИТ, предназначенные для хранения в неактивированном состоянии, конструкция которых включает устройство для активирования.

В зависимости от природы электролита различают ХИТ с водными и неводными растворами электролитов, с расплавленными и твердыми электролитами.

Первичные ХИТ с водными растворами электролитов

[33.1—33.5, 33.9, 33.10]

Элементы системы диоксид марганца — цинк с солевым электролитом. Наиболее распространенные элементы изготавливаются на основе системы диоксид марганца — цинк с солевым электролитом:



$$U_{р.д} = 1,5 \div 1,7 \text{ В.}$$

Таблица 33.1. Элементы системы диоксид марганца — цинк и диоксид марганца, кислород воздуха — цинк с солевым электролитом

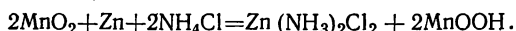
Обозначение	ГОСТ	Размеры, мм				Масса, г	Гарантийный срок хранения, мес	Напряжение свежих элементов, В	Сопротивление внешней цепи при измерении напряжения, Ом	Продолжительность работы при 20 °С, мин						Характеристики режима разряда				Цена элемента, руб.
		Длина	Ширина	Высота	Диаметр					свежезаготовленных элементов		в конце гарантийного срока хранения		Непрерывный разряд		Прерывистый разряд				
										при непрерывном разряде	при прерывном разряде	при непрерывном разряде	при прерывном разряде	Сопротивление внешней цепи, Ом	Конечное напряжение, В	Сопротивление внешней цепи, Ом	Конечное напряжение, В	Периодичность разряда		
285	12333-74	—	—	44,5	10,5	10	3	1,48	50	1200	4320	960	2880	200	1,0	300	0,9	12 ч в день ежедневно	—	
314		—	—	38,0	14,5	15	6	1,52	—	2280	4500	1800	3600	—	—	—	—	—		
316		—	—	50,5	14,5	20	9	—	—	3600	10800	2880	6000	—	—	—	—	—		
332		—	—	37,3	21,5	30	6	1,40	10	360	100	288	80	20	0,85	5	0,75	5 мин в день, 5 дней в неделю	—	
336	12333-74	—	—	60,0	21,5	45	6	—	—	600	400	420	170	—	—	—	—	5 мин в день, 10 мин в день	—	
343		—	—	50,0	26,2	50	18	1,50	—	720	300	540	200	—	—	—	—	5 дней в неделю	—	
373		—	—	61,5	34,2	115	18	1,55	—	2400	1100	1680	690	—	—	—	—	30 мин в день, 5 дней в неделю	—	
374		—	—	73,0	34,2	130	18	1,55	—	3000	1300	2100	720	—	—	—	—	—	—	
376	—	—	—	91,0	34,2	165	18	—	—	3900	1700	2730	1115	—	—	—	—	—	—	
425		—	—	100,0	40,0	235	15	1,48	—	8640	—	6000	—	—	—	—	—	—	—	
465		—	—	125,0	51,0	502	18	1,50	—	29700	—	20400	—	—	—	—	—	—	—	
145Л	3316-81	42	42	102	—	300	12	1,48	20	9600	—	780	—	20	0,85	—	—	—	0,46	
145У		—	—	—	—	18	1,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,50		
165Л	—	57	57	132	—	700	21	1,50	10	33000	—	24000	—	20	0,85	—	—	—	0,63	
165У		—	—	—	—	21	1,66	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,75		
045	296-76	57	57	132	—	600	15	1,3	10	33000	—	24000	—	10	0,7	—	—	—	0,51	
076		82	82	176	—	1700	18	—	5	48000	—	36000	—	5	—	—	—	1,27		
1,28-НВМЦ-525П	—	160	160	185	—	6500	15	1,28	2	1100 ч	1200 ч	—	840 ч	2	0,8	5,5	0,95	4 ч в день	—	
1,28-НВМЦ-525	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	665 ч	—	500 ч	—	—	2,0	0,85	—	—	

Примечания: 1. Элементы 045, 076; 1,28-НВМЦ-525П и 1,28-НВМЦ-525 — системы диоксид марганца, кислород воздуха — цинк, остальные элементы — системы диоксида марганца — цинк.

2. Размеры элементов 425 и 465 указаны без футляра.

3. Элементы 045, 076, 1,28-НВМЦ предназначены для работы при температуре не ниже -10°C , элементы 145Л и 165Л — от -17°C до $+60^{\circ}\text{C}$, элементы 145У и 165У — от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Продолжительность работы свежих элементов 286, 314, 316, 332, 336, 343, 373, 374 и 376 при -40°C должна быть не менее 5 % номинальной, элементов 145Л при -17°C и элементов 145У при -40°C — не менее 37,5 % номинальной, элементов 165Л при -10°C и 165У при -40°C — не менее 20 % номинальной.

Электролит находится в пастообразном состоянии или пропитывает пористую диафрагму. Такой электролит мало подвижен и не растекается, поэтому элементы называются сухими. Токообразующая реакция в элементе с солевым электролитом может быть записана в виде



Сухие элементы с солевым электролитом разделяют на три типа, которые предназначены для следующих интервалов температур:

Универсальный (У)	От -40 до +60 °С
Летний (Л)	От -20 до +60 °С
Тропический (Т)	От -10 до +60 °С

Сухие элементы системы диоксид марганца — цинк имеют цилиндрическую, прямоугольную или дисковую форму. В цилиндрических и прямоугольных элементах цинковый анод одновременно является сосудом ХИТ. Эти элементы называют стаканчиковыми. На рис. 33.2 представлена схема цилиндрического эле-

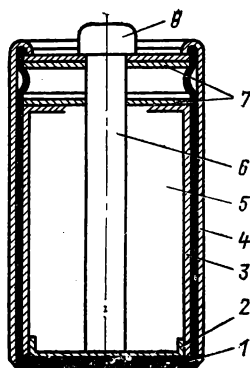


Рис. 33.2. Схема элемента 373 («Марс») цилиндрического типа с солевым электролитом:

1 — отрицательный электрод; 2 — картонная чашечка; 3 — пастовая диафрагма; 4 — футляр с этикеткой; 5 — активная масса положительного электрода; 6 — угольный стержень; 7 — картонные шайбы; 8 — латунный колпачок

мента набивного типа, катод которого состоит из активной массы, содержащей диоксид марганца, и угольного стержня. Активная масса подпрессовывается при изготовлении элемента. Анод от катода отделяется диафрагмой, пропитанной раствором электролита. Стаканчиковые элементы также выпускаются с пастообразным электролитом, в который вводится мука или крахмал.

Дисковые элементы состоят из цинковой пластины, картонной диафрагмы, пропитанной раствором электролита, и спрессованного слоя положительного электрода (рис. 33.3). На внешнюю поверхность анода наносится токо-

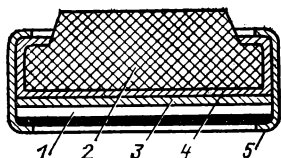


Рис. 33.3. Схема дискового сухого элемента:

1 — цинковый электрод с электропроводящим слоем; 2 — активная масса положительного электрода; 3 — диафрагма с пастой; 4 — бумажная прокладка; 5 — кольцо из поливинилхлорида

проводящий водонепроницаемый слой из углеродистого материала и связующего. Дисковые элементы последовательно соединяют друг с другом, полученную батарею изолируют и упаковывают в футляр. Такие батареи называются галетными.

В табл. 33.1 приведены данные элементов и батарей рассматриваемой системы, предназначенных для питания радио-, телефонной, геологоразведочной и другой аппаратуры, карманных фонарей и т. д. Удельная энергия элементов и батарей в зависимости от их конструкции и условий разряда изменяется в пределах 30—65 Вт·ч/кг и 60—130 кВт·ч/м³.

Достоинством ХИТ на основе системы диоксид марганца — цинк с солевым электролитом является их относительно низкая стоимость. К существенным их недостаткам следует отнести значительное изменение напряжения при разряде (рис. 33.4), невысокую удельную мощность (5—10 Вт/кг) и малую сохранность.

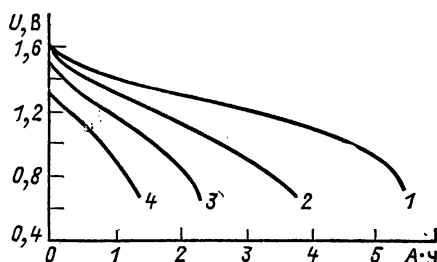
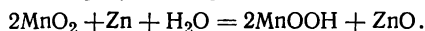


Рис. 33.4. Разрядные кривые элемента 373 с солевым электролитом при 20 °С. Токи разряда 10 (1), 40 (2), 100 (3) и 250 (4) мА

Можно снизить расход диоксида марганца и соответственно повысить емкость элемента, если обеспечить доступ воздуха к катоду во время работы ХИТ. В этом случае наряду с восстановлением диоксида марганца на катоде будет реагировать кислород воздуха. Соответственно электрохимическая система такого элемента будет обозначаться диоксид марганца, кислород воздуха — цинк. Параметры элементов такой системы также приведены в табл. 33.1.

Элементы системы диоксид марганца — цинк с щелочным электролитом. Электролитом в этих элементах служит 30—40 %-ный раствор гидроксида калия, пропитывающий пористую диафрагму или смешанный до пастообразного состояния с крахмалом.

Токообразующая реакция в элементе



Для увеличения поверхности анода цинк применяют в виде пасты или прессованного порошка. Элементы имеют стальной корпус и выполняются в дисковом (пуговичном) либо в цилиндрическом виде. Напряжение элементов с щелочным электролитом изменяется при разряде значительно меньше, чем у элементов с солевым электролитом (рис. 33.5). Элементы с щелочным электролитом также имеют более высокие удельную энергию (65—90 Вт·ч/кг и 100—150 кВт·ч/м³) и сохранность, чем элементы с солевым электролитом. Данные некоторых элементов и батарей, применяемых для питания слуховых аппаратов, аппаратов

Таблица 33.2. Элементы и батареи системы диоксид марганца — цинк с щелочным электролитом

Обозначение	Торговое название	Размеры, мм			Масса, г	Гарантийный срок хранения, мес	Характеристика при непрерывном разряде свежизготовленных элементов при 20 °С		Характеристики при прерывистом разряде и 20° С**				Режим прерывистого разряда (5 сут в неделю)		
		Длина	Ширина	Высота			Диаметр	Продолжительность работы при напряжении, В, при сопротивлении 200 Ом до 0,85 В, ч		Свежизготовленные элементы		После гарантийного срока хранения		Сопротивление, Ом	Конечное напряжение, В
								Напряжение, В	Продолжительность работы, ч	Напряжение, В	Продолжительность работы, ч	Продолжительность работы, ч	Продолжительность работы в сут-ки, ч		
A332*	«Ореол»	—	—	37,3	21,5	35	6	15	1,38	—	2/3,3	1,5/2,5	0,08	5	0,75
A336*	«Свет»	—	—	60,0	21,5	55	6	40	1,38	—	7/8,3	3,7/6,7	0,17	5	0,75
A343*	«Салют»	—	—	50,0	26,2	70	12	50	1,38	—	8,3/12,5	6,7/10,0	0,17	5	0,75
A373*	«Мир»	—	—	61,5	34,2	140	12	100	1,40	—	30/36,7	23,0/28,3	0,5	15	0,75
—	«Рубин»	63,0	23,0	67,0	—	150	6	—	3,8	10,0	7,5	60	0,17	100	2,25
—	«Рубин-1»	63,0	22,0	67,0	150	9	—	—	4,2	75,0	60	4	4	900	2,7
—	«Финиш»***	26,0	21,0	69,0	58	9	—	—	9,5	90,0	60	(15 сут, затем 2 ч)	—	900	5,6

* ГОСТ 24721-81.

** В числителе указаны характеристики элементов обычного исполнения, в знаменателе — исполнения экстра.

*** Система диоксид марганца, кислород воздуха — цинк.

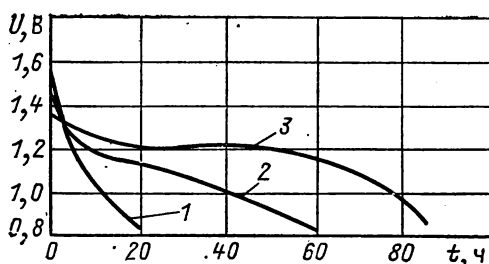
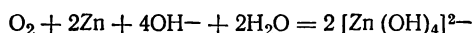


Рис. 33.5. Разрядные кривые сухих элементов: масса элементов 16 г, нагрузка 25 мА, температура 21 °С:

1 — $\text{MnO}_2/\text{NH}_4\text{Cl}/\text{Zn}$; 2 — $\text{MnO}_2/\text{KOH}/\text{Zn}$; 3 — $\text{HgO}/\text{KOH}/\text{Zn}$

связи, малогабаритной радио- и другой аппаратуры приведены в табл. 33.2.

Элементы системы кислород воздуха — цинк. Окислителем в элементе служит кислород воздуха, электролитом — раствор щелочи. Токообразующая реакция записывается уравнением



Восстановление кислорода происходит на каталитически активном пористом электроде, содержащем гидрофобизатор (парафин, каучук или полиэтилен).

На рис. 33.6 приведена схема одного из элементов батарей «Крона ВЦ» (ГОСТ 17659-79). Анодом в элементе служит амальгамированный порошок цинка, катодом — прессованная смесь активированного угля, ацетиленовой сажи и гидрофобизатора. Электролит состоит из раствора гидроксида калия, загущенного крахмалом и мукой. Размеры батареи 48,5×17,5×26,5 мм, масса 40 г. Батарея имеет напряжение 9 В (свежеприготовленная) и 8 В (в конце гарантийного срока хранения 9 мес). Продолжительность работы при прерывистом режиме разряда (4 ч в сутки, сопротивление внешней цепи 900 Ом и конечное напряжение 5,4 В) составляет 80 ч (для свежизготовленной батареи) и 44 ч (в конце гарантийного срока хранения). Батарея работоспособна в интервале температур от —10 до +50 °С. Удельная энергия батареи 150—200 Вт·ч/кг.

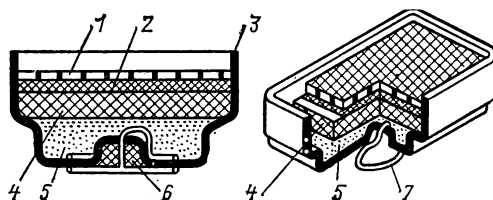


Рис. 33.6. Схема элемента батарей «Крона ВЦ»:

1 — токоотвод; 2 — положительный электрод; 3 — корпус из винипласта; 4 — диафрагма; 5 — активная масса отрицательного электрода; 6 — изолирующий слой; 7 — токоотвод отрицательного электрода

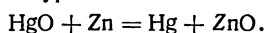
Т а б л и ц а 33.3. Элементы системы оксид ртути — цинк (ГОСТ 12537-76)

Обозначение	Размеры, мм		Масса, г	Гарантийный срок хранения, мес	Номинальная емкость при 20° С, А·ч	Параметры при непрерывном разряде до напряжения 0,9 В при 0° С и 1 В при 20—50° С				Номинальная температура окружающего воздуха, °С	Цена, руб.
	Диаметр	Высота				Начальное напряжение при температуре 20° С, В	Сопротивление внешней цепи, Ом	Продолжительность работы, ч, при температурах, °С			
								25—50	0		
РЦ-63	21,0	7,4	11,0	24	0,65	1,25	60	33	16	0—50	0,55
РЦ-65	21,0	13,0	18,1	36	1,1	1,22	60	55	16	0—50	0,69
РЦ-73	25,5	8,4	17,2	24	1,1	1,25	40	38	16	0—50	0,57
РЦ-75	25,5	13,5	27,3	36	1,8	1,22	40	60	18	0—50	0,92
РЦ-82	30,1	9,4	30,0	24	1,5	1,25	25	—	12	0—70	1,43
РЦ-83	30,1	9,4	28,2	24	1,8	1,25	25	38	16	0—50	0,87
РЦ-85	30,1	14,0	39,5	36	2,8	1,25	25	60	15	—30—+50	1,00

Элементы системы оксид ртути — цинк. Окислителем в элементе служит оксид ртути, электролитом — раствор щелочи



Токообразующую реакцию в элементе можно выразить уравнением



На рис. 33.7 представлена схема дискового элемента системы оксид ртути — цинк. Оксид ртути в смеси с 5—10 % графита запрессовывается в стальной корпус.

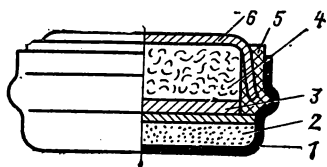


Рис. 33.7. Схема дискового элемента системы оксид ртути — цинк:

1 — корпус; 2 — положительный электрод; 3 — диафрагма; 4 — отрицательный электрод; 5 — уплотнительное кольцо; 6 — крышка

Анодом служит смесь порошка цинка с 10 % ртути. Анод и катод разделены сепаратором и

диафрагмой, пропитанной 35—40 %-ным раствором гидроксида калия с добавкой 5 % оксида цинка. Как видно из рис. 33.8, при высоких внешних сопротивлениях элемент имеет стабильное напряжение. Данные некоторых элементов, применяемых в измерительной аппаратуре, слуховых аппаратах, транзисторных радиоприемниках, кино- и фотоаппаратуре и других устройствах, приведены в табл. 33.3.

Как следует из табл. 33.3, номинальная емкость этих элементов не соответствует их обозначению. По сравнению с элементами системы оксид марганца — цинк элементы системы оксид ртути — цинк имеют более стабильное напряжение (см. рис. 33.5), высокую

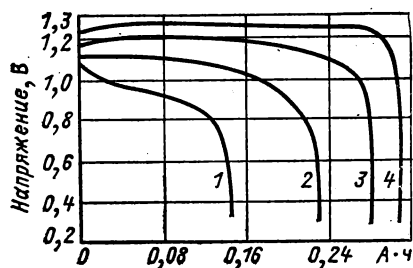


Рис. 33.8. Разрядные кривые элемента РЦ-53 при 20°С. Сопротивление внешней цепи 16 Ом (1), 45 Ом (2), 100 Ом (3), 1000 Ом (4)

Т а б л и ц а 33.4. Резервные ХИТ систем хлорид свинца — магний и хлорид меди — магний

Обозначение	Размеры, мм			Масса, г		Сопротивление внешней цепи, Ом	Напряжение, В			Продолжитель- ность работы при температуре —15÷+25°С, с	Гарантийный срок хранения, мес	Время достиже- ния начального напряжения с мо- мента включения, мин	Цена, руб.
	Длина	Ширина	Высота	в сухом со- стоянии	в замоченном состоянии		начальное	максимальное	конечное				
6ПМХС-0,5	35	33	48	39	50	8,62	1,5	6,0	4,0	0,5	15	15	0,56
12ПМХС-0,5	46	36	49	68	83	3,50	6,3	12,7	10,0	0,5	18	5	0,81
7ПМХС-3,5	114	48	112	750	900	—	—	7,0	—	2,5	—	—	—
7ПМХС-12	202	104	106	2300	2800	4,0	—	7,0	—	4,0	—	—	—
80ПМХС-М-2ч	95	58	58	275	320	5000	75	90	75	2,0	30	20	3,75
						13,0	2,4	3,3	2,4				
200ПМХМ-2	150	125	80	650	850	7700	—	200	—	2,0	—	—	6,17

Примечания: 1. ПМХС — приборный ХИТ системы магний — хлорид свинца, ПМХМ — приборный ХИТ системы магний — хлорид меди.

2. Для ХИТ 80ПМХС-М-2ч (ТУ 16-729.133-78) электрические параметры приводятся для цепи анода (числитель) и цепи накала (знаменатель).

3. Рабочий интервал температур от —50 до +50°С.

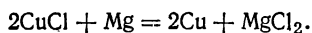
удельную энергию (90—120 Вт·ч/кг и 300—400 кВт·ч/м³) и более высокую сохранность. Однако они дороги, и их параметры заметно ухудшаются при снижении температуры.

Для малогабаритных приборов созданы модернизированные элементы системы оксид ртути — цинк типов РЦ-31С, РЦ-33С и РЦ-55УС. Удельная энергия элементов РЦ-31С и РЦ-55УС — 600 кВт·ч/м³, элементов РЦ-33С — 700 кВт·ч/м³. Элементы РЦ-31С и РЦ-33С в составе батарей применяются для питания ручных электрочасов и другой аппаратуры, элементы РЦ-55УС предназначены для медицинской аппаратуры, в частности для вживляемых медицинских приборов.

Элементы РЦ-31С и РЦ-33С работают до 1,5 лет при токах соответственно 10 и 18 мкА, а элемент РЦ-55УС обеспечивает работу вживляемых медицинских приборов в течение 5 лет. Так как ртуть дефицитна и токсична, ртутно-цинковые элементы нельзя выбрасывать после их полного использования. Они должны поступать на переработку в организации Вторцветмет.

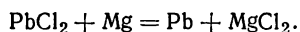
Резервные ХИТ. В зависимости от способа активации резервные ХИТ подразделяются на водоактивируемые, ампульные, газоактивируемые и тепловые ХИТ. Водоактивируемые ХИТ приводятся в действие путем подачи к электродам воды, ампульные — путем подачи к электродам электролита, находящегося в отдельных ампулах. Тепловые ХИТ приводятся в действие расплавлением твердого электролита путем его нагревания. Предложено также активирование ХИТ подводом газов, например аммиака или хлора.

В источнике тока системы хлористая медь — магний после активирования водой протекает основная реакция



Батарей элементов этой системы применяются для питания радиозондов, плавучих бакенов, спасательного оборудования, переносных сигнализационных устройств. Показатели батарей этой системы 200ПМХМ-2 приведены в табл. 33.4.

Водоактивируемый ХИТ системы хлорид свинца — магний также применяется для питания радиозондов, радиоаппаратуры и переносного оборудования. Токообразующая реакция в ХИТ



Показатели некоторых ХИТ этой системы приведены в табл. 33.4.

В ампульных резервных ХИТ электролитом служит раствор хлорной, борфтористоводородной или кремнефтористоводородной кислоты либо раствор щелочи. Элементы с хлорной кислотой имеют свинцовый анод и катод из диоксида свинца. Напряжение разомкнутой цепи 1,85—2,3 В, рабочее напряжение 1,6—2,1 В. Удельная энергия ХИТ 20—40 Вт·ч/кг и 50—100 кВт·ч/м³. Разработаны и другие ампульные резервные ХИТ.

Первичные ХИТ с неводными растворами электролитов [33.2, 33.3]

В последние годы ведется разработка новых электрохимических систем элементов. В качестве активного материала анода нашел применение литий, в качестве активных материалов катода — сульфид меди CuS , диоксид марганца MnO_2 , триоксид молибдена MoO_3 , хромат серебра Ag_2CrO_4 , фторуглерод $(\text{CF})_n$, диоксид серы SO_2 , тионил хлорид SOCl_2 и др. Ионными проводниками в элементах с такими системами служат неводные растворы электролитов, так как в водных растворах электролитов литий неустойчив. На основе электрохимических систем с литиевым анодом разработано несколько видов элементов, некоторые из них уже выпускаются мелкими сериями.

В качестве растворителей в таких элементах обычно используются органические соединения: пропиленкарбонат, бутиролактан, тетрагидрофуран, диметилсульфоксид и др. Растворителями также служат некоторые неорганические соединения, например SOCl_2 , которые одновременно являются и активными веществами (окислителями). Ионная проводимость обеспечивается введением в растворители солей, имеющих анионы больших размеров, например LiAlCl_4 , LiClO_4 , LiBF_4 . Удельная электрическая проводимость неводных растворов электролитов на 1—2 порядка ниже проводимости водных растворов электролитов. Кроме того, катодные процессы в них обычно протекают медленно. Поэтому в элементах с неводными электролитами плотности тока невелики (1 порядка 1 мА/см²). Исключение составляют элементы с окислителем SO_2 и особенно SOCl_2 , в которых удалось достигнуть более высоких плотностей тока.

Достоинством элементов с неводными электролитами и литиевыми анодами является высокая удельная энергия (табл. 33.5).

Таблица 33.5. Некоторые элементы с неводными электролитами и литиевым анодом

Окислитель в системе элемента	Напряжение разомкнутой цепи, В	Рабочее напряжение, В	Удельная энергия при 20 °С	
			Вт·ч/кг	кВт·ч/м³
MoO_3	—	3—2,7	200—250	—
CuS	2,5	1,8—1,5	200—300	470
Ag_2CrO_4	3,4	3,3—3,0	До 300	800
$(\text{CF})_n$	3,3	2,8—2,2	200—300	450—500
SO_2	2,9	2,8—2,2	200—350	500
SOCl_2	3,6	3,5—3,0	300—500	650—1000

К важным достоинствам элементов с неводными электролитами следует отнести их способность сохранять приемлемые параметры при отрицательных температурах. Как видно из рис. 33.9, элементы могут работать при температурах —40 и —54 °С. Элемент на основе системы SO_2 —Li при —40 °С имеет емкость, равную 65 % емкости при +20 °С. Поэтому преимущества элементов с неводными растворами

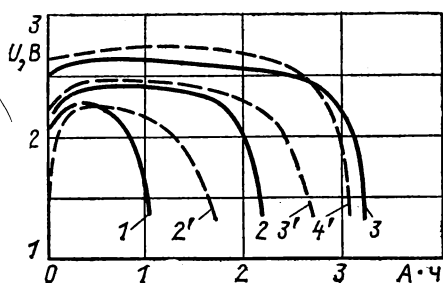


Рис. 33.9. Разрядные кривые элемента системы SO_2 — Li с неводным электролитом. Объем элемента $22,6 \text{ см}^3$, масса 41 г . Температура -54°C (1), -40°C (2 и 2'), -20°C (3 и 3') и 25°C (4'). Токи разряда 200 мА (1—3) и 500 мА (2', 3' и 4')

и литиевыми анодами особенно заметны при низких температурах. Емкость элемента фтор—углерод—литий при 20°C в 1,5 раза, а при 0°C примерно в 5 раз выше емкости батарей элементов системы оксид ртути—цинк такого же размера. Разница в удельной энергии на единицу массы еще выше, так как масса ртутно-цинковой батареи в 2,3 раза больше массы элемента с неводным электролитом.

К недостаткам элементов с неводными электролитами следует отнести относительно высокую стоимость, обусловленную высокой ценой лития и некоторыми особыми требованиями к их производству (необходимость инертной атмосферы, очистки неводных растворов). Следует также учитывать, что элементы системы тионил хлорид—литий взрывоопасны.

Элементы с неводными электролитами находят применение для питания клавишных ЭВМ, переносной радиоаппаратуры, часов, фото- и киноаппаратуры и других малогабаритных устройств. Они перспективны для питания средств медицинской техники. В частности, для питания вживляемых кардиостимуляторов разработан элемент системы хромат серебра—литий, имеющий удельную энергию до $800 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$.

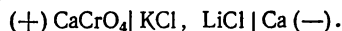
Первичные ХИТ с расплавленными и твердыми электролитами [33.2—33.4]

Тепловые ХИТ. Высокой ионной проводимостью обладают расплавленные электролиты. Поэтому ХИТ с такими электролитами могут работать при высоких плотностях тока. В таких ХИТ можно применять восстановители, которые неустойчивы в водных растворах. Практическое применение нашли резервные ХИТ, активируемые нагреванием, в процессе которого происходит плавление электролита, находящегося в твердом состоянии в соприкосновении с электродами.

В тепловых элементах и батареях анодами служат кальций, магний или сплавы лития, активным веществом катода — оксиды тяжелых металлов (вольфрама), хроматы кальция, калия, цинка, сульфиды железа и др. В качестве электролита применяется смесь галогенидов щелочных металлов, например LiCl — KCl .

Источник тока включает в себя пиротехнические средства для расплавления электроли-

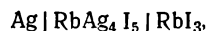
та и другие составные части. В качестве примера приведем элемент:



Напряжение элемента при 480 — 500°C равно $2,0$ — $2,5 \text{ В}$. Элемент обычно используется в составе батареи из последовательно соединенных элементов. Тепловые батареи имеют высокую удельную мощность (до $600 \text{ Вт}/\text{кг}$), могут работать в широком интервале температур окружающей среды (-70 — $+70^\circ\text{C}$). Однако продолжительность их разряда (обычно 1 — 15 мин) и удельная энергия (3 — $10 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$) невелики.

Первичные ХИТ с твердыми электролитами. Вещества, обладающие ионной проводимостью в твердом состоянии, называются твердыми электролитами. Ионная проводимость их обусловлена наличием ионных дефектов (вакансий) в узлах кристаллической решетки. В последние годы открыты твердые электролиты, имеющие высокую ионную проводимость при невысоких температурах. Например, ионная проводимость электролита RbAg_4I_5 при 25°C составляет $26 \text{ См}/\text{м}$.

На основе твердых электролитов разрабатываются первичные ХИТ, обладающие сохранностью 10 лет и более. Анодами в этих элементах служат серебро, медь, литий и другие металлы, окислителями — иод и его соединения, а также некоторые органические вещества. Практическое применение нашли, например, элементы



Элементы разряжаются очень малыми токами, поэтому срок их службы может достигать 10 лет. Элемент с литиевым анодом имеет высокую удельную энергию — до $200 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$. Элементы с твердыми электролитами нашли применение для питания малогабаритных устройств, в том числе в медицине для вживляемых кардиостимуляторов.

33.3. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ [33.3, 33.6, 33.7]

В топливном элементе (ТЭ) происходит непосредственно процесс преобразования химической энергии в электрическую, поэтому батарея ТЭ является главной составной частью электрохимического генератора (ЭХГ). Электроды ТЭ при работе не расходуются, к ним непрерывно подводится окислитель и восстановитель (топливо). На катоде восстанавливается окислитель, на аноде окисляется восстановитель. Для ускорения процессов окисления и восстановления применяются каталитически активные электроды с высокоразвитой поверхностью. Ионным проводником в ТЭ служат либо водные растворы щелочей и кислот, либо расплавленные или твердые электролиты.

Кроме природных видов топлива, таких как углеводороды, в ТЭ могут быть использованы получаемые из них вещества: метанол, водород, гидразин, а также некоторые металлы. Окислителями могут служить кислород (воздух), перекись водорода и вода.

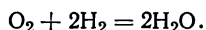
Так как реагенты хранятся вне ТЭ, то эти источники тока не характеризуются разрядной кривой и емкостью.

Батарея ТЭ, системы подвода реагентов, отвода тепла и продуктов реакции, а также автоматики входят в состав ЭХГ, последний вместе с системами хранения реагентов — в состав электрохимической энергоустановки. Электрохимическая энергоустановка характеризуется напряжением, мощностью, энергией и удельной энергией, КПД и ресурсом.

Под КПД понимается отношение электрической энергии, отдаваемой энергоустановкой, к химической энергии, подводимой к установке. Ресурсом электрохимической установки называется продолжительность работы в заданных пределах параметров.

Наиболее разработаны ТЭ и ЭХГ на основе электрохимических систем кислород (воздух) — водород, кислород (воздух) — гидразин, перекись водорода — гидразин и вода — литий.

Кислородно (воздушно)-водородные ТЭ и ЭХГ. Токообразующей реакцией в кислородно-водородном элементе является реакция окисления водорода



Катализаторами кислородного электрода служат уголь, серебро, платина, оксиды никеля и кобальта, катализаторами водородного электрода — платина и палладий, никель, карбид вольфрама и др. В качестве электролита используются растворы гидроксида калия или серной кислоты, ионообменные мембраны или асбестовые матрицы, пропитанные раствором гидроксида калия. Кроме электродов и электролита, ТЭ обычно имеют другие части: анодную и катодную камеры, устройства для отвода тепла, токосъемники, прокладки. В состав некоторых ТЭ входят пористые пластины для электролита, фитили для отвода воды и т. д. На рис. 33.10 приведена схема кислородно-водородного элемента с матричным электролитом.

Напряжение кислородно-водородных элементов различных фирм и организаций лежит в пределах 0,8—0,9 В при плотности тока 0,1—0,4 А/см² и температуре 70—90 °С. Напряжение воздушно-кислородных элементов различных фирм и организаций лежит в пределах 0,8—0,9 В при плотности тока 0,05—0,1 А/см² и температуре 50—60 °С.

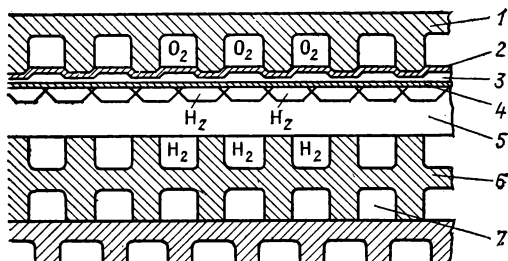


Рис. 33.10. Схема ТЭ системы $\text{O}_2\text{—H}_2$ фирмы «Пратти и Уитни»:

1 — плата кислородной камеры; 2 — катод; 3 — асбестовая матрица; 4 — анод; 5 — пористая пластина для электролита; 6 — плата водородной камеры; 7 — теплоноситель

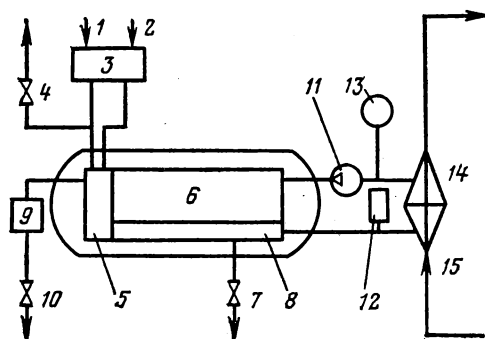
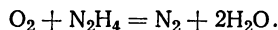


Рис. 33.11. Схема ЭХГ фирмы «Дженерал электрик»:

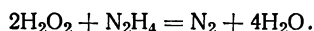
1 — ввод водорода; 2 — ввод кислорода; 3 — регулятор давления; 4 — предохранительный клапан; 5 — увлажнитель газов; 6 — батарея ТЭ; 7 — продувка O_2 ; 8 — сепаратор H_2O ; 9 — регулятор давления; 10 — отвод воды; 11 — насос теплоносителя; 12 — клапан регулятора температуры; 13 — аккумулятор теплоносителя; 14 — теплообменник; 15 — охлаждение теплообменника

На основе ТЭ созданы ЭХГ мощностью от сотен ватт до 100 кВт. На рис. 33.11 для примера приведена схема ЭХГ фирмы «Дженерал электрик», созданного на основе ТЭ с ионообменной мембраной. Электрохимические генераторы нашли применение для питания аппаратуры космических кораблей и станций: «Джемини», «Апполон», «Шаттл» и др. Электрохимический генератор для космического корабля «Апполон» имел мощность 0,56—2,3 кВт и напряжение 31—21 В. Генератор питал корабль электроэнергией и водой. Потребление водорода и кислорода составляло 0,36 кг/(кВт·ч), удельная энергия всей энергоустановки при полете корабля на Луну составляла 0,86 кВт·ч/кг. Широкие перспективы ЭХГ на основе системы кислород (воздух) — водород откроются при развитии водородной энергетики.

Гидразиновые ЭХГ. Токообразующая реакция в ТЭ на основе систем воздух — гидразин и кислород — гидразин может быть записана в виде



Электролитом в элементе служит раствор гидроксида калия. Материалом анода обычно служит никель, активированный никелевой чернью, кобальтом, палладием, материалом катода — обычно уголь. Созданы образцы ЭХГ мощностью от 60 Вт до 40 кВт с удельной энергией от 200 до 400 Вт·ч/кг. Окислителем в гидразиновых ТЭ и ЭХГ может быть перекись водорода. Токообразующая реакция в этом случае изображается уравнением



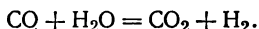
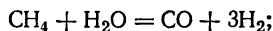
Элементы этой системы могут быть очень компактными (толщиной до 1 мм). Благодаря этому ЭХГ имеют высокую удельную мощность (100—200 Вт/кг и 150—300 кВт/м³). Энергоустановки с использованием гидразина могут найти применение для питания портативных радиоустановок, установок связи, а также аппаратов и установок, работающих под водой.

ЭХГ на основе системы вода—литий. Большой интерес для применения в океане имеет ЭХГ на основе системы вода—литий, в котором токообразующая реакция имеет вид



Образующаяся в результате реакции пленка гидроксида лития предотвращает прямое взаимодействие лития с водой, поэтому литий скисляется без взрыва. Образцы ЭХГ мощностью 10—100 кВт имели удельную энергию 200—250 Вт·ч/кг.

Энергоустановки с использованием углеводородов и угля. Природные углеводороды и уголь пока не могут быть непосредственно использованы в ТЭ, работающем при температуре ниже 400—500 °С, так как скорость их анодного окисления мала. Поэтому они предварительно подвергаются переработке с целью получения водорода или смеси водорода с другими газами. Природный газ, например, подвергают конверсии водяным паром в присутствии катализаторов



Уголь обрабатывают водяным паром или смесью водяного пара и кислорода. Основными продуктами этих реакций являются водород и оксид углерода.

Продукты переработки углеводородов и угля затем подаются в среднетемпературный или высокотемпературный ЭХГ. Среднетемпературный ЭХГ имеет воздушно-водородный ТЭ с фосфорнокислым электролитом, работающий при 200 °С. В высокотемпературных ЭХГ применяются ТЭ либо с расплавленным, либо с твердым электролитом. Расплавленный электролит состоит из смеси карбонатов натрия, лития и калия. Элемент с таким электролитом работает при 600—700 °С. Твердым электролитом ТЭ служит смесь диоксида циркония ZrO_2 и триоксида иттрия Y_2O_3 . Элементы работают при 1000 °С.

Кроме блока аппаратов для обработки углеводородов и ЭХГ энергоустановка может иметь инвертор. Схема энергоустановки приведена на рис. 33.12. Созданы и испытаны установки мощностью 12 кВт, работающие на природном газе, ведутся испытания установок мощностью 40 кВт и 4,8 МВт, ведется разработка электрохимических электростанций мощностью 7,5; 11 и 600 МВт. КПД этих установок составляет 38—45 %. Кроме электроэнергии, электрохимические установки генерируют тепло, которое может быть использовано на теплофикацию, для генерации пара или для генерации электроэнергии в паровых или газовых

турбинах. При этом суммарный КПД установок существенно возрастает. Например, КПД по электроэнергии электрохимической электростанции, в которой тепло ЭХГ используется в паротурбинном цикле, может достигать 50—60 %.

33.4. ВТОРИЧНЫЕ ХИТ

Выпускаемые промышленностью вторичные ХИТ подразделяются на кислотные и щелочные. Ведется разработка новых аккумулято-

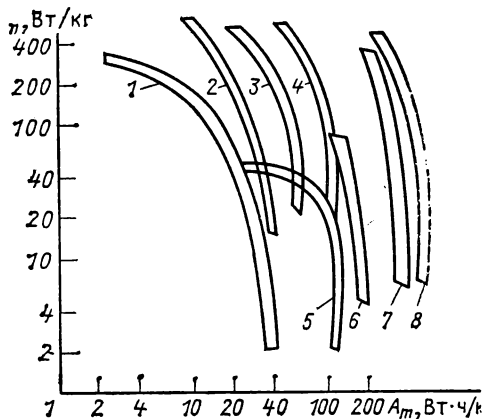


Рис. 33.13. Удельная энергия и мощность аккумуляторов: свинцовых (1), никель-кадмевых (2), никель-цинковых (3), серебряно-цинковых (4), воздушно-железных (5), воздушно-цинковых (6), серно-натриевых (7) и серно-литиевых (8)

ров с щелочными, расплавленными и твердыми электролитами [33.3]. На рис. 33.13 приведены удельные параметры некоторых аккумуляторов.

Кислотные (свинцовые) аккумуляторы и батареи [33.1—33.5, 33.10, 33.11]



$$E_0 = 2,06 - 2,15 \text{ В.}$$

Суммарное уравнение обратимой реакции в свинцовом аккумуляторе имеет вид: $\text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Pb} \xrightleftharpoons[\text{заряд}]{\text{разряд}} 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

Как видно, при заряде на одном электроде (положительном) образуется диоксид свинца, на втором электроде (отрицательном) — свинец. При разряде диоксид свинца и свинец превращаются в сульфат свинца.

Аккумулятор состоит из положительного и отрицательного электродов, раствора серной кислоты (27—39 %-ный) и сепаратора.

Применяются два типа электродов: поверхностные и пастированные. Поверхностный электрод состоит из свинцовой пластины, на поверхности которой электрохимически формируется слой активной массы. Пастированные электроды подразделяются на решетчатые (намазные), коробчатые и панцирные.

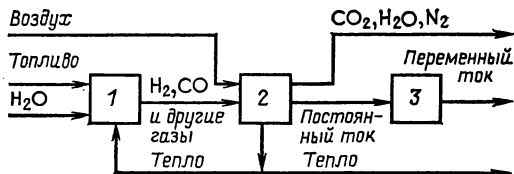


Рис. 33.12. Схема электрохимической энергоустановки: 1 — блок аппаратов для обработки топлива; 2 — ЭХГ; 3 — инвертор

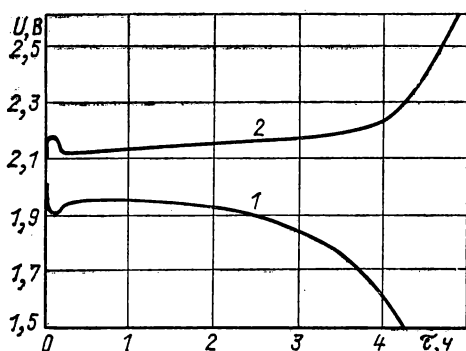


Рис. 33.14. Кривые разряда (1) и заряда (2) свинцового аккумулятора при 20 °C

В решетчатых (намазных) электродах активная масса удерживается в решетке из свинцово-сурьмяного сплава толщиной 1—4 мм. В коробчатых пластинах решетки с активной массой закрываются с двух сторон перфорированными свинцовыми листами.

Панцирные пластины состоят из свинцово-сурьмяных штырей, которые помещаются внутри пластмассовых перфорированных трубок, заполненных активной массой. Для отрицательных электродов используются намазные и коробчатые пластины, для положительных электродов — поверхностные, намазные и панцирные. В качестве сепараторов применяют микропористые пластины из вулканизированного каучука (мипор), поливинилхлорида (мипласт) и стекловолокна.

Свинцовые аккумуляторы обычно соединяют в батарею, которую помещают в моноблок из эбонита, пластмассы (термопласта), полипропилена, полистирола, полиэтилена, асфальтопечковой композиции, керамики или стекла.

Одной из важнейших характеристик аккумулятора является срок службы (годы) или технический ресурс — наработка (число циклов). Ухудшение параметров аккумулятора и выход их из строя обусловлены в основном коррозией решетки и оползанием активной массы положительного электрода. Срок службы аккумулятора определяется в первую очередь типом положительных пластин и условиями эксплуатации.

Аккумуляторы и батареи имеют условное буквенно-цифровое обозначение. Первая цифра указывает число последовательно соединенных аккумуляторов. Так как номинальное напряжение свинцового аккумулятора равно двум, то

номинальное напряжение аккумуляторной батареи равно числу последовательно соединенных элементов, умноженному на два.

Буква после первой цифры обозначает тип или назначение аккумуляторов или батарей: С — стационарные, СТ — стартерные; А — авиационные, В — вагонные и т. д. Следующие цифры указывают номинальную емкость. Кроме того, могут быть указаны тип пластин (например, намазные), материал сосуда (Э — эбонит, С — стекло) и сепаратора (М — мипласт, Р — мипор, С — стекловолокно). Для некоторых аккумуляторов указываются климатическое исполнение и размещение. Например, стартерная батарея из трех аккумуляторов емкостью 65 А·ч в моноблоке из эбонита и с сепаратором из мипласта имеет условное обозначение: батарея ЗСТ-65ЭМ, ГОСТ 959.0-79.

Свинцовые аккумуляторы имеют высокие разрядные напряжения (рис. 33.14) и удельную мощность (до 100—150 Вт/кг) и относительно недороги. К основным их недостаткам следует отнести низкую удельную энергию и относительно малый ресурс. Совершенствование свинцовых аккумуляторов идет по пути изыскания новых сплавов для решеток (например, свинцово-кальциевых), облегченных и прочных материалов баков (например, на основе сополимера пропилена и этилена), улучшения качества сепараторов. Разработаны герметичные свинцовые аккумуляторы, которые не требуют доливки воды при эксплуатации, не имеют газовыделения и кислотного тумана. В настоящее время герметичные свинцовые аккумуляторы осваиваются промышленностью [33.2, 33.3].

Стационарные свинцовые аккумуляторные батареи предназначены для эксплуатации на постоянном месте или в условиях, исключающих перемещение аккумуляторов или машин, в которых они установлены. В большинстве выпускаемых аккумуляторов (типов С, СЗ, СК и СКЭ) положительными электродами служат поверхностные пластины, отрицательными электродами — коробчатые пластины. Баки изготавливаются из стекла, дерева (выложенного изнутри свинцом) или эбонита.

Буквенные обозначения аккумуляторов указывают: С — стационарный длительный разряд, К — короткий разряд, З — закрытое исполнение, Э — эбонит, материал бака.

Параметры аккумуляторов приведены в табл. 33.6.

Максимальный ток заряда аккумуляторов с $N=1$ равен 9 А. Емкости и токи разряда и заряда аккумуляторов других номеров (N) можно найти, перемножив соответствующие значения, приведенные в табл. 33.6, на N аккумулятора. Например, параметры аккумулятора С-10 при 10-ч разряде равны: емкость 36·10=

Таблица 33.6. Основные электрические параметры стационарных аккумуляторов

Параметр	СК-1	СКЭ-1, СЗ-1, СН-1	С-1, СК-1, СКЭ-1, СЗ-1, СН-1
Режим разряда, ч	0,25	0,5	1,0
Ток разряда, А	32/40	25/30	18,5/20,0
Емкость, А·ч	8/10	12,5/15,0	18,5/20,0
Наименьшее напряжение в конце разряда, В		1,75	
			3,0
			9/10
			27/30
			10,0
			3,6/4,0
			36/40
			1,80

Примечание. В числителе указаны параметры аккумуляторов типов С, СК, СЗ и СКЭ, в знаменателе — аккумуляторов типа СН.

Таблица 33.7. Габаритные размеры и масса стационарных свинцовых аккумуляторов

Тип	Размеры сосуда, мм			Масса аккумулятора без электролита, кг	Объем электролита, л (плотность 1180 кг/м³)	Материал бака	Цена, руб.
	Длина	Ширина	Высота				
СК-1	80	215	270	6,8	3,0	Стекло	6,40
СЗ-1	104	230	370	10	3,0		16,30
СК-2	130	215	270	12	5,5		12,30
СЗ-2	145	230	370	14	5,5		22,50
СК-3	180	215	270	16	8,0		17,10
СЗ-3	184	232	373	17	8,0		28,00
СК-4	260	215	270	21	11,6		29,50
СК-5	260	215	270	25	11,0		26,50
СЗ-5	264	232	373	28	11,0		45,00
СК-6	205	220	485	30	15,5		32,00
СК-8	205	220	485	37	14,5		39,00
С-10, СК-10	270	220	485	46	21,5		48,00
С-12, СК-12	270	220	485	53	20,0		57,00
С-14, СК-14	315	220	485	61	23,0		65,00
С-16, СК-16	345	220	485	68	36,5		76,00
СЗЭ-20	500	230	745	110	52,0	Эбонит	158,00
С-18, СК-18	469	279	583	101	37,7	Дерево, выложенное свинцом	115,00
С-20, СК-20	504	279	583	110	41,0		121,00
С-24, СК-24	344			138	50,0		147,00
С-28, СК-28	379	474	588	155	54,0		165,00
С-144, СК-144	1459	484	598	661	237,0	То же	737,00
С-148, СК-148	1499			685	245,0		763,00
СЭ-16, СКЭ-16	469	225		69	34,7	Эбонит	—
СЭ-18, СКЭ-18				75	33,4		—
СЭ-20, СКЭ-20			540	82	32,3		—
СЭ-24, СКЭ-24	347	415		105	48,0		128,00
СЭ-28, СКЭ-28				120	45,0		143,00
СЭ-72, СКЭ-72	790	415	540	303	123,0	То же	—
СЭ-76, СКЭ-76				319	129,5		—
СН-1	96	222	308	8,7	2,2	То же	—
СН-2	140			12,8	3,5		—
СН-3	182			17,6	4,8		—
СН-4	152	262	430	23,0	6,0	То же	—
СН-5	175			26,7	7,0		—
СН-6	194			31,5	8,0		—
СН-8	233			36,5	10,0		82,00
СН-10	276	255		43,7	12,0	—	90,00
СН-20	295	380	520	87,0	25,0	То же	153,00

$=360$ А·ч, ток разряда $3,6 \cdot 10 = 36$ А, ток заряда $9 \cdot 10 = 90$ А. Саморазряд аккумуляторов не более 23 % при хранении в течение 29 сут и не более 16 % при хранении в течение 14 сут. Размеры и масса аккумуляторов типов С, СЗ, СК и СКЭ согласно ГОСТ 825-73 указаны в табл. 33.7. Удельная энергия стационарных аккумуляторов этого типа составляет 10—23 Вт·ч/кг. Гарантийный срок хранения 1 год. Гарантийный срок службы при соблюдении правил ухода 4 года, наработка 800—1000 циклов.

Стационарные аккумуляторы с поверхностными пластинами содержат относительно большую долю свинца по отношению к активной массе. Большинство из них не имеет крышек, поэтому требует частой заливки воды и хорошо вентилируемого помещения. Они собираются, как правило, у потребителя. Указанные недостатки устранены в стационарных аккумуляторах с намазными пластинами типа СН. Эти аккумуляторы собираются на заводах и имеют крышки. Они выделяют значительно меньше вредных испарений. Электрические параметры аккумулятора СН-1 приведены в табл. 33.6, а масса и размеры аккумуляторов серии СН — в табл. 33.7. Удельная энергия аккумуляторов серии СН равна 11—19 Вт·ч/кг и 17—44 кВт·ч/м³.

На базе аккумуляторов СН созданы аккумуляторы СНУ емкостью от 80 до 2240 А·ч, обладающие повышенной механической прочностью. К стационарным также относятся автоблокировочные свинцовые аккумуляторы АБН-72-УХЛ2 и АБН-80-УХЛ2 (ГОСТ 21728-76).

Аккумуляторы АБН применяются на железных дорогах для питания устройств автоблокировки, сигнализации, телемеханики и связи в стационарных условиях. Буква Н означает намазные пластины. Номинальная емкость указана для режима 25-ч разряда. Емкость при 12-ч разряде составляет 82—83 %, при 5-ч разряде — 68—69 % номинальной. Обозначение УХЛ2 указывает на климатическое исполнение и категорию размещения (2). Аккумуляторы предназначены для работы при температуре окружающей среды от -50 до $+55$ °С и температуре электролита не ниже -10 °С. Гарантийный срок хранения аккумулятора в сухом виде 1 год с момента изготовления, срок службы 2 года. Саморазряд аккумулятора, отключенного от сети, при температуре воздуха (25 ± 10) °С за 28 сут не должен превышать 28 %.

Размеры и масса аккумуляторов приведены в табл. 33.8.

Таблица 33.8. Габаритные размеры и массы свинцовых автоблокировочных аккумуляторов

Тип	Размеры, мм			Масса, кг		Цена, руб.
	Длина	Ширина	Высота	без электролита	с электролитом	
АБН-72-УХЛ2	128	207	318	8,05	10,47	7—50
АБН-80-УХЛ2	86	165	283	4,80	7,20	6—50

Стартерные батареи. Свинцовые стартерные батареи предназначены для автомобилей, автобусов, тракторов и других машин (сельскохозяйственных и дорожных и т. п.) (ГОСТ 959.0-79, 959.1-79, 959.2-79, 959.4-79, 959.5-79, 959.7-79, 959.9-79, 959.11-79, 959.13-79, 959.15-79, 959.17-79, 959.19-79, 959.21-79, 959.23-79, 959.25-79).

Гарантийный срок хранения не залитых раствором электролита батарей установлен 3 года, срок службы 2 года, наработка 2500—3000 ч. Батареи предназначены для работы при температуре окружающего воздуха от -35 до $+60$ °С.

Удельная энергия стартерных аккумуляторов составляет 26—36 Вт·ч/кг, планируется ее повысить до 40 Вт·ч/кг путем применения полипропиленовых моноблоков и других усовершенствований.

Авиационные батареи. Батареи предназначены для автономного запуска двигателей и бортовых электроагрегатов, для питания электросети при аварийных режимах в системе энергоснабжения самолетов (бортовые), а также для запуска двигателей и для проверки энергооборудования самолетов на аэродроме (аэродромные). В табл. 33.9 приведены данные авиационных батарей согласно ГОСТ 18402-77.

Таблица 33.9. Авиационные свинцовые аккумуляторные батареи

Тип	Габаритные размеры, мм			Масса батареи с электролитом, кг	Ток разряда, А	
	Длина	Ширина	Высота		при 5-ч разряде	при стартерном разряде
12-АСАМ-23	369	163	214	31,0	5,0	650—75
12-САМ-28	369	163	214	28,5	5,6	650—75
16-САМ-55	323	164	214	29,0	—	—
12-АСА-145	712	733	338	180	25,0	1350—250

Примечания: 1. АСАМ — авиационная стартерная моноблочная с адсорбированным электролитом. САМ — стартерная авиационная моноблочная, АСА — авиационная стартерная аэродромная.
2. Указанная в обозначении батарей номинальная емкость соответствует 5-ч разряду.

Гарантийный срок хранения батарей 7 лет, кроме батареи 12-АСА-145, для которой установлен срок хранения 5 лет с момента изготовления. Гарантийный срок эксплуатации батареи 2 года, кроме батареи 12-АСАМ-23, для которой устанавливается срок работы 1 год с момента ввода в эксплуатацию.

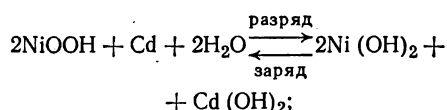
Щелочные аккумуляторы и батареи [33.1—33.5, 33.9, 33.10]

В щелочных аккумуляторах электролитом служит раствор щелочи, обычно гидроксида калия. Наиболее распространены щелочные никель-кадмиевые и никель-железные аккумуляторы. Кроме того, в небольших масштабах выпускаются серебряно-цинковые и серебряно-кадмиевые аккумуляторы.

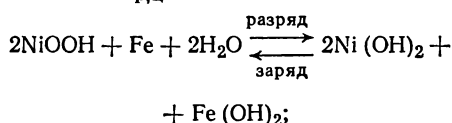
Щелочные электролиты также используются в разрабатываемых аккумуляторах: никель-

цинковых, воздушно-цинковых, воздушно-железных, никель-водородных и кислородно-водородных.

Никель-кадмиевые и никель-железные аккумуляторы и батареи. Суммарные основные уравнения процессов разряда и заряда в аккумуляторах имеют вид



$$U_{p,z} = 1,30 \div 1,35 \text{ В};$$



$$U_{p,z} = 1,35 \div 1,40 \text{ В}.$$

Активная масса положительных электродов состоит из гидроксида никеля, активная масса отрицательных электродов — соответственно из кадмия или железа. Электролитом служит раствор гидроксида калия (KOH) плотностью 1190—1210 кг/м³ с добавкой 20 кг/м³ моногидрата гидроксида лития (LiOH·H₂O). Большинство никель-кадмиевых и никель-железных аккумуляторов выпускается в ламельном исполнении, активная масса помещается внутри сменных перфорированных коробок (ламелей). Кроме того, некоторые аккумуляторы имеют прессованные и спеченные электроды, в порах которых находится активная масса, и фольговые электроды, у которых к поверхности металлической фольги припечен слой с активным веществом. Аккумуляторы помещаются в стальные никелированные сосуды.

Напряжение аккумулятора зависит от режима разряда (рис. 33.15). Номинальное напряжение равно 1,15 В. Данные аккумуляторов согласно ГОСТ 9240-79 и 25355-82 приведены в табл. 33.10. Номинальная емкость для НК, указанная в обозначении, соответствует разрядному току, приведенному в таблице.

Соединяя указанные аккумуляторы, можно получить батареи с различными параметрами. Батареи помещаются в деревянные ящики, рамки или металлические каркасы. Батареи в

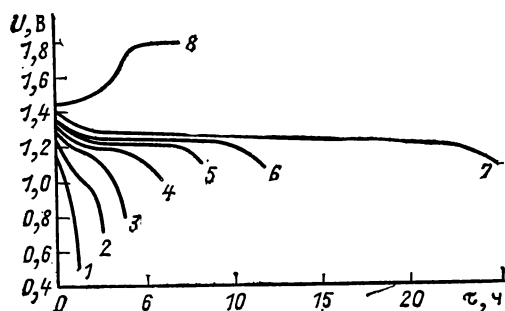


Рис. 33.15. Кривые разряда (1—7) и заряда (8) никель-кадмиевого аккумулятора при 20 °С. Режимы разряда: одночасовой (1); 2-часовой (2); 3-часовой (3); 4-часовой (4); 8-часовой (5); 10-часовой (6) и 25-часовой (7). Ток заряда численно равен 1/4 номинальной емкости

Таблица 33.10. Характеристики никель-кадмиевых (НК) и никель-железных (НЖ) аккумуляторов

Тип аккумулятора	Габаритные размеры, мм			Масса, кг		Нормальный зарядный ток при 6-ч разряде, А	Нормальный разрядный ток, А, до конечного напряжения 1В	Цена, руб.
	Длина	Ширина	Высота	без электролита	с электролитом			
НК-13	103	34	126	0,60	0,75	3,3	1,3	1,95
НК-28	127	34	216	1,35	1,69	7,0	2,8	3,65
НК-55	127	55	216	2,2	2,78	14,0	5,5	4,65
НК-80	154	47	352	3,5	4,46	20,0	8,0	7,80
НК-125	154	72	352	5,10	6,60	31,0	12,50	10,80
НЖ-42	127	34	216	1,35	1,69	5,5	2,75	2,35
НЖ-45	127	55	216	2,20	2,78	11,2	5,65	3,40
НЖ-60	154	47	352	3,50	4,46	15,0	7,50	4,65
НЖ-100	154	72	352	5,10	6,60	25,0	12,50	6,60

металлических каркасах обозначаются буквой К. Кроме того, в обозначениях батарей буквой Т указывают вывод на торцевую сторону, римскими цифрами — расположение аккумуляторов в рамках: I — в один ряд по длине, II — в два ряда по длине.

Емкость никель-кадмиевых аккумуляторов составляет не менее 0,6 номинальной емкости при —20 °С и не менее 0,2 номинальной емкости при —40 °С.

Срок хранения ламельных никель-кадмиевых аккумуляторов 5 лет, никель-железных аккумуляторов 3,5 года, наработка — 1000 циклов.

Применение полиэтиленовых сосудов и другие усовершенствования позволяют улучшить параметры ламельных аккумуляторов, выпускаемых по ГОСТ 9240-79 и 25355-82. Новые аккумуляторы имеют обозначения НЖЛ и предназначены для замены соответствующих НК и НЖ аккумуляторов: НЖ-22 и НК-28 на НЖЛ-36; НЖ-45 и НК-55 на НЖЛ-60; НЖ-60 и НК-80 на НЖЛ-85.

Одновременные испытания батарей 4НЖЛ-60 и 4НЖ-45 показали преимущество первых. Они имеют более высокие емкость и удельную энергию (20 Вт·ч/кг).

Наибольший объем щелочных аккумуляторов, выпускаемых промышленностью, составляют тяговые никель-железные ХИТ (ТНЖШ), имеющие емкость 360—1150 А·ч и предназначенные для электровозов, пассажирских железнодорожных вагонов и внутризаводского транспорта. Тяговые аккумуляторы изготавливаются в металлическом корпусе со щелочстойким электроизоляционным покрытием или резиновым чехлом или в пластмассовых сосудах. В качестве электролита в них используется водный раствор гидроксида натрия (плотностью 1190—1210 кг/м³) с добавкой 20 г/л гидроксида лития.

На основе аккумуляторов ТНЖШ созданы батареи 66ТНЖШ-300П, 66ТНЖШ-350, 96ТНЖШ-500, 112ТНЖШ-500, 112ТНЖШ-550, 154ТНЖШ-550 и 126ТНЖШ-650*. Выпускаются также батареи из 22, 26, 27, 28, 34, 36 и 40

* Первое число обозначает число последовательно соединенных аккумуляторов, последнее — емкость, А·ч.

последовательно соединенных аккумуляторов емкостью 350 А·ч, батарей из 32, 36 и 40 аккумуляторов емкостью 550 А·ч, из 24 и 36 аккумуляторов емкостью 600 А·ч и из 36 аккумуляторов емкостью 1150 А·ч.

Номинальное напряжение батареи равно произведению номинального напряжения аккумулятора на число аккумуляторов и коэффициент 0,98, учитывающий потери напряжения в перемычках. Параметры тяговых аккумуляторов удалось улучшить путем применения отрицательных безламельных электродов и с помощью других усовершенствований. Такие аккумуляторы предназначены для безрельсового транспорта (тип аккумулятора ТНЖК по ГОСТ 22492-77). Удельная энергия аккумуляторов серии ТНЖК (31—36 Вт·ч/кг и 58—67 кВт·ч/м³) заметно выше, чем у аккумуляторов серии ТНЖ (21—26 Вт·ч/кг и 44—48 кВт·ч/м³).

Аккумуляторы предназначены для работы при температуре электролита от —20 до +45 °С. В аккумуляторах, предназначенных для работы при —20 °С, должен использоваться в качестве электролита водный раствор гидроксида калия плотностью 1260—1280 кг/м³ без добавки гидроксида лития. Срок хранения аккумуляторов 3,5 года, ресурс — 7000 ч, наработка — 1000 циклов.

На основе аккумуляторов ТНЖК собираются батареи 34ТНЖК-300, 36ТНЖК-300, 20ТНЖК-400, 22ТНЖК-400, 34ТНЖК-400, 40ТНЖК-400, 36ТНЖК-500, 40ТНЖК-500, 34ТНЖК-600, 36ТНЖК-600, 36ТНЖК-700, 36ТНЖК-1000.

Особую группу никель-кадмиевых аккумуляторов составляют герметичные аккумуляторы, в которых положительные электроды имеют меньшую емкость, чем отрицательные электроды. Выделяющийся в конце заряда кислород окисляет кадмий, поэтому давление в аккумуляторе не повышается. Скорость образования кислорода должна быть невелика, поэтому аккумулятор заряжают относительно небольшим током. Герметичные аккумуляторы подразделяются на дисковые (обозначение Д) (ГОСТ 11258-79), цилиндрические (обозначение Ц) и прямоугольные (обозначение НКГ) (ГОСТ 24958-81).

В табл. 33.11 приведены данные дисковых и цилиндрических аккумуляторов и батарей.

Герметичные аккумуляторы применяются для слуховых аппаратов, малогабаритных радиоприемников, магнитофонов, киноаппаратуры, карманных фонарей и т. д.

Гарантийный срок хранения аккумуляторов Д-0,1 — 15 мес, Д-0,25 — 6 мес, батареи 7Д-0,115 — 14 мес. Гарантийный срок эксплуатации аккумуляторов Д-0,25 — 12 мес, а Д-0,1 — 14 мес, батареи 7Д-0,115 — 15 мес.

Наработка дисковых аккумуляторов до 400 циклов, цилиндрических аккумуляторов — от 100 до 300 циклов в зависимости от условий испытаний. Герметичные прямоугольные никель-кадмиевые аккумуляторы производятся с отрицательными и неметаллокерамическими электродами из оксида кадмия (тип НКГК) или с металлокерамическими кадмиевыми электродами (тип НКГ). Номинальная емкость выпускаемых аккумуляторов лежит в пределах 3,5—50,0 А·ч, удельная энергия 16—23 Вт·ч/кг и 45—63 кВт·ч/м³.

Таблица 33.11. Данные герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов и батарей

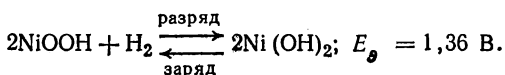
Тип аккумулятора и батарей	Габаритные размеры, мм		Масса, г	Зарядный ток, мА	Разрядный ток, мА
	Диаметр	Высота			
Д-0,1	20,0	6,9	7	12	23
Д-0,25	27,0	10	14	25	50
7Д-0,115-У1,1	24,0	62	60	12	20
ЦНК-0,2	16,0	24,5	15	20	20
ЦНК-0,45	14,0	50	21	45	45
ЦНК-0,85	14,0	96	41	85	85
ЦНК-0,9-У2	14,0	96	49	90	90
3ЦНК-0,2	16,0	74	40	20	40
5ЦНК-0,2	87×24	27	117	20	100
11ЦНК-0,45	112×39	57	350	45	90

Примечания: 1. Номинальная емкость и номинальное напряжение при 20 °С соответствуют 5-ч режиму разряда, за исключением батарей 7Д-0,115-У1,1, у которой номинальная емкость и напряжение приведены для 10-ч режима разряда (разрядный ток 11,5 мА). При —18 °С емкость составляет 30 % номинальной.

2. Номинальное напряжение аккумуляторной батареи равно числу аккумуляторов, умноженному на 1,2 В.

3. Время заряда аккумуляторов и батарей 15 ч.

Никель-водородные аккумуляторы [33.2, 33.3]. Разработан аккумулятор, в котором анодом служит водородный электрод. Токообразующая реакция в аккумуляторе



Водород либо хранится непосредственно в сосуда аккумулятора, либо обратимо поглощается интерметаллидами, например соединениями FeTi, NiTi₂. По сравнению с никель-кадмиевым аккумулятором никель-водородный аккумулятор имеет высокую удельную энергию. Например, аккумулятор НВ-40 имеет емкость 40 А·ч, удельную энергию 45 Вт·ч/кг и 80 кВт·ч/м³. Максимальное давление водорода 40 МПа.

На базе аккумулятора НВ-10-У4 создана батарея 12НВ-10-У4 для питания электрооборудования светового трала. Размеры батареи 182×168×190 мм, масса 7 кг, номинальное напряжение 15 В, номинальная емкость 10 А·ч (при 2-ч разряде), наработка 200 циклов.

К недостаткам никель-водородного аккумулятора следует отнести саморазряд из-за взаимодействия водорода с активной массой положительного электрода. Поэтому в заряженном состоянии он хранится лишь кратковременно (потеря емкости за сутки составляет 6—10 %).

Серебряно-цинковые аккумуляторы. Активными веществами в аккумуляторах служат оксид серебра и цинк, электролитом — раствор КОН. Аккумуляторы имеют высокие удельные энергию (до 130 В·ч/кг) и мощность (до 500 Вт/кг). Разрядная кривая аккумуляторов имеет две площадки, одна из

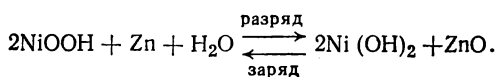
них — при напряжении 1,8 В, вторая — 1,54 В. Недостатками серебряно-цинковых аккумуляторов является их высокая цена, дефицитность серебра и малая наработка (10—100 циклов).

Изготавливаются аккумуляторы следующих пяти типов: СЦК, СЦС, СЦД, СЦМ, СЦБ. Буквы СЦ означают серебряно-цинковую систему, К, С, Д — режим разряда: короткий (до 1 ч), средний (1—5 ч) и длинный (10—20 ч). М — средний режим разряда с большой наработкой (до 100 циклов), Б — продолжительный режим разряда с большой наработкой, допускающий импульсные нагрузки (буферный).

Выпускаются аккумуляторы емкостью 3,5, 15, 18, 25, 40, 50 и 70 А·ч.

Аккумуляторы типов СЦК, СЦС, СЦД, СЦМ, СЦБ одной и той же емкости имеют одинаковые размеры, но отличаются значениями массы. Например, аккумуляторы СЦК-25, СЦС-25, СЦД-25, СЦМ-25, СЦБ-25 имеют длину 50 мм, ширину 500 мм, высоту 137,5 мм и массу соответственно, кг: 0,555 (СЦК), 0,545 (СЦС), 0,545 (СЦД), 0,540 (СЦМ), 0,530 (СЦБ).

Никель-цинковые аккумуляторы [33.2, 33.3]. Активными веществами в аккумуляторах служат гидроксид никеля и цинк, электролитом — раствор гидроксида калия. Суммарная реакция в аккумуляторе:



Напряжение при разряде 1,7—1,8 В, удельная энергия до 50—70 Вт·ч/кг.

Испытаны аккумуляторы различной емкости. Например, аккумулятор НЦ-125 имеет емкость 125 А·ч при 2-ч разряде и номинальное напряжение 1,65 В. Габаритные размеры 239×123×82 мм, масса с электролитом 4,3 кг. Удельная энергия 50 Вт·ч/кг и 100 кВт·ч/м³. Аккумулятор НЦ-240 имеет емкость 240—280 А·ч, массу — 9 кг. Наработка аккумулятора 150 циклов.

Воздушно-металлические аккумуляторы [33.3]

При использовании кислорода воздуха можно значительно повысить удельную энергию аккумулятора. Ведется разработка воздушно-цинковых и воздушно-железных аккумуляторов. Несмотря на большое число исследований, до сих пор не удалось решить проблему увеличения ресурса воздушно-цинковых аккумуляторов. Поэтому возможность создания технически приемлемых аккумуляторов не ясна.

Определенные успехи достигнуты в создании воздушно-железных аккумуляторов. Удельная энергия испытанных в лаборатории батарей составляла 50—60 Вт·ч/кг. Однако удельная мощность — 10—12 Вт/кг и напряжение (0,65 В) невелики.

Аккумуляторы с твердыми и расплавленными электролитами [33.2, 33.3]

Для разработки электромобиля с дальностью пробега без перезарядки свыше 100 км требуются аккумуляторы с удельной энергией 100 Вт·ч/кг и выше. К перспективному направлению решения этой проблемы относится создание аккумуляторов с твердыми и расплавленными электролитами. Наибольший интерес вызывает серно-натриевый аккумулятор, в котором электролитом служит полиалюминат натрия $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$, имеющий ионную (по Na^+) электропроводность. Удельная проводимость алюмината натрия составляет 3,0—3,5 См/м при 25 °С и 23—30 См/м при 300 °С. Активными веществами этого аккумулятора являются сера на положительном электроде и натрий на отрицательном электроде. Реагенты при 300 °С находятся в жидком, электролит — в твердом состоянии.

Напряжение разомкнутой цепи 2,1 В. Созданы и испытаны аккумуляторы и батареи с удельной энергией 100 Вт·ч/кг и выше. Однако ресурс аккумуляторов пока еще мал из-за выхода из строя электролита при циклировании ХИТ.

В аккумуляторах с расплавленным электролитом активными веществами служат сера и литий, электролитом — расплавленная смесь хлоридов лития и калия.

Для увеличения ресурса аккумулятора вместо лития используют его сплав с алюминием или кремнием, вместо серы — сульфид железа. Аккумулятор на этой электрохимической системе работает при 400—450 °С. При плотности тока 0,1 А/см² напряжение 1,4—1,8 В, удельная энергия свыше 100 Вт·ч/кг. Однако разработка аккумулятора с расплавленным электролитом пока еще находится на уровне научных исследований.

33.5. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРОВ И БАТАРЕЙ [33.11]

В связи с большой номенклатурой аккумуляторов и батарей и различными режимами их заряда разработано большое число средств для заряда вторичных ХИТ.

Первоначально для этих целей использовались в основном дизель-генераторы и двигатели-генераторы. Например, на электростанциях применялись установки марок ПН и П мощностью от 0,4 до 155 кВт. Подзарядные и зарядные агрегаты марки П имели генераторы П-32—П-82 номинальной мощностью 1,7—42 кВт и двигатели от АО2-31-4 до АО2-52-4 мощностью от 2,2 до 10 кВт и от А2-71-4 до А2-82-4 мощностью от 17 до 55 кВт. Созданы двигатели-генераторы ЗП5/30, ЗП7,5/30, ЗП7,5/60 и ЗП12/60 для заряда и буферной работы с аккумуляторными батареями (первое число обозначает мощность в киловаттах, второе — среднее напряжение в вольтах).

Более широкое применение в качестве зарядных устройств имеют выпрямители. Так, для заряда аккумуляторных батарей на электростанциях нашли применение выпрямители ВА36/2-6, ВА312/24-20, ВА375-245, ВА350-125, ВА370-150, ВА370-230 (первое число означает

номинальное напряжение, последнее — номинальный ток). Для заряда стартерных аккумуляторов используется устройство ЗУ-1 с выходным напряжением 6—12 В. Для заряда шахтных аккумуляторов применяются серийно выпускаемые устройства ЗУК-75/120, ЗУК-155/230 и ЗУК-155/230К.

Промышленность выпускает серию выпрямительных зарядных устройств типа ВУК с номинальными напряжениями 24, 60, 120 и 220 В и максимальными выпрямленными токами 7—600 А. Например, устройство ВУК140/70 имеет максимальное напряжение 140 В, номинальное 120 В, пределы стабилизации напряжения 116—132 В, наибольший выпрямленный ток 70 А.

Более высокие энергетические характеристики и меньшую массу и объем на единицу мощности имеют тиристорные автоматические зарядные устройства серии УЗА. В обозначениях этих устройств числа означают номинальный ток и номинальное напряжение. Например, УЗА150-120 означает: устройство зарядное автоматическое с номинальным током 150 А и номинальным напряжением 120 В.

Номинальное напряжение зарядного агрегата для подзарядки аккумуляторных батарей должно соответствовать нормальному напряжению на шинах.

Агрегаты для заряда аккумуляторных батарей должны допускать регулировку напряжения от значения, равного ЭДС батареи аккумуляторов, до максимального зарядного напряжения батареи аккумуляторов.

33.6. ПРИМЕНЕНИЕ АККУМУЛЯТОРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ И ПОДСТАНЦИЯХ [33.12]

Для питания устройств управления, регулирования режима работы, сигнализации, релейной защиты и автоматики электрических станций и подстанций используются источники, называемые источниками оперативного тока. На крупных электрических станциях и подстанциях источниками оперативного тока обычно служат аккумуляторные батареи. Они также используются для питания других установок, например аварийного освещения, резервных масляных насосов и т. д.

На электрических станциях небольшой мощности (до 50 МВт) рекомендуется устанавливать одну аккумуляторную батарею, на более мощных электростанциях — две батареи и более.

На электростанциях с большим числом агрегатов устанавливают несколько аккумуляторных батарей. Каждая из батарей питает оперативные цепи одного-двух агрегатов. На подстанциях 110—35 кВ рекомендуется применять одну, а на более крупных подстанциях — две аккумуляторные батареи. Аккумуляторные батареи на электрических станциях и подстанциях обычно работают в режиме постоянного подзаряда, при этом зарядное устройство питает электроприемники сети оперативного тока и одновременно подзаряжает аккумуляторные батареи.

На электростанциях и подстанциях обычно используются свинцовые аккумуляторы, реже никель-железные аккумуляторы ТНЖ.

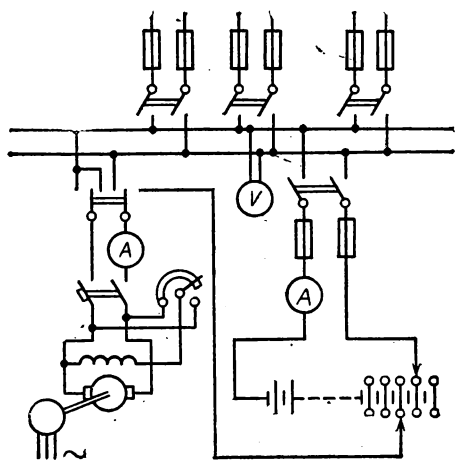


Рис. 33.16. Схема подключения аккумуляторной батареи с элементарным коммутатором

Используют несколько схем подключения аккумуляторных батарей. Чаще всего используют схему подключения с элементарным коммутатором, приведенную на рис. 33.16. Коммутатор состоит из изолирующей плиты с расположенными на ней контактными пластинами и двумя шинами — разрядной и зарядной. На схеме коммутатор условно показан с двумя рядами пластин.

Батарея присоединена к сборным шинам через разрядную шину коммутаторов. Генератор с помощью двухполюсного переключателя может быть присоединен к сборным шинам или зарядной шине коммутатора. Защита ветвей осуществлена с помощью плавких предохранителей, кроме ветви генератора, где предусмотрен автоматический выключатель максимального и обратного тока. Последний защищает генератор от коротких замыканий, а также от аномальной работы в режиме двигателя с питанием от батареи, что может произойти при исчезновении переменного тока. Для контроля за работой батарей и зарядного агрегата предусмотрены необходимые измерительные приборы.

Разрядную щетку коммутатора устанавливают всегда так, чтобы обеспечить нормальное напряжение на сборных шинах, например 230 В. При разряде батареи в нормальном режиме ток нагрузки мал и напряжение аккумулятора составляет 2,0—1,95 В. Следовательно, к сборным шинам должно быть присоединено 115—118 аккумуляторов. В аварийном режиме, когда батарея разряжается большим током, число аккумуляторов должно быть увеличено соответствующим перемещением разрядной щетки. В конце разряда все аккумуляторы должны быть введены в работу.

Для заряда батареи зарядную щетку коммутатора ставят в крайнее положение, при котором все аккумуляторы включены, переключатель генераторов ставят в положение «заряд», пускают зарядный агрегат и включают автомат. При заряде напряжение аккумуляторов повышается и разрядную щетку постепенно перемещают в сторону уменьшения числа

аккумуляторов, присоединенных к сборным шинам.

Описанный метод использования аккумуляторной батареи с периодическими зарядами и соответствующая схема имеют следующие существенные недостатки. Батарея подвергается частым зарядам, что уменьшает срок службы аккумуляторов. Число аккумуляторов, участвующих в работе, все время изменяется как при разряде, так и при заряде. Следовательно, аккумуляторы всегда находятся на разных стадиях разряда или заряда, что затрудняет наблюдение и уход за ними. Крайние аккумуляторы обычно перезаряжаются, износ их заметно больше остальных аккумуляторов. Частые заряды отнимают у лиц, обслуживающих установку, много времени. Таким образом, эксплуатация батареи по методу заряд—разряд оказывается неэкономичной.

В настоящее время аккумуляторные батареи на электростанциях в основном работают в режиме постоянного подзаряда. При этом обычно используется схема с элементом коммутатором, приведенная на рис. 33.16.

В отличие от режима заряд—разряд агрегат здесь работает постоянно. Он присоединен к сборным шинам, несет постоянную нагрузку и подзаряжает батарею. Разрядная щетка коммутатора (через нее теперь проходит подзарядный ток) должна быть установлена так, чтобы на каждый аккумулятор приходилось около 2,2 В. Следовательно, при напряжении 230 В к сборным шинам должно быть присоединено $230/2,2=105$ аккумуляторов. Через них проходит небольшой подзарядный ток. Остальные аккумуляторы с порядковыми номерами от 106 до 125 не подзаряжаются. Они используются только при исчезновении напряжения в системе собственных нужд, когда батарея переходит в состояние разряда и напряжение понижается. При заряде батареи напряжение повышается и разрядная щетка коммутатора должна быть перемещена в сторону уменьшения числа аккумуляторов.

При нормальном режиме кратковременные толчки тока воспринимаются совместно батареей и преобразователем. Распределение тока между ними зависит от внешних характеристик. Если преобразователем служит двигатель-генератор небольшой мощности, большую часть тока принимает на себя батарея, внешняя характеристика которой относительно полого. Полупроводниковый преобразователь способен принять больший ток. Энергия, израсходованная батареей при кратковременном разряде, невелика и быстро восполняется из системы через преобразователь.

Перевод аккумуляторных батарей в режим постоянного подзаряда способствовал улучшению условий работы большей части аккумуляторов (105 из 125). Отпала необходимость ежесуточных зарядов. Эксплуатация установки упростилась. Число аккумуляторов в батарее, работающей в режиме постоянного подзаряда, рассчитывается по уравнению

$$n_{\text{подз}} = U_{\text{ш}}/U_{\text{подз}},$$

где $U_{\text{ш}}$ — нормальное напряжение на шинах батареи; $U_{\text{подз}}$ — напряжение аккумулятора при подзаряде.

Для свинцовых аккумуляторов СК ток подзаряда должен быть не менее

$$I_{\text{подз}} \geq 0,03 C_{\text{ном}}/36 = 0,03N.$$

Обычно $I_{\text{подз}}=0,15N$. При этом напряжение подзаряда $U_{\text{подз}}$ аккумулятора СК равно 2,15 В.

Соответственно при напряжении на шинах $U_{\text{ш}}=230$ В число аккумуляторов в батарее равно:

$$n_{\text{подз}} = 230/2,15 = 107.$$

Мощность подзарядных устройств для батареи, работающей в режиме постоянного подзаряда, выбирается из условия

$$P_{\text{подз}} > U_{\text{ш}} (I_{\text{подз}} + I_{\text{пост}}),$$

где $I_{\text{подз}}$ — ток подзаряда; $I_{\text{пост}}$ — ток постоянной длительной нагрузки.

Расчетная емкость для батареи, работающей в режиме постоянного подзаряда,

$$C_{\text{расч}} = (I_{\text{пост}} + I_{\text{ав}}) t_{\text{ав}},$$

где $I_{\text{пост}}$ — ток постоянной длительной нагрузки; $I_{\text{ав}}$ — ток аварийной (временной) нагрузки.

Длительность разряда при аварийном перерыве электроснабжения трехфазным током $t_{\text{ав}}$, ч, принимается:

Для станций и подстанций, работающих в системе	1
Для гидроэлектростанций, работающих в системе	0,5
Для изолированно работающих станций	2

Расчетный ток длительного разряда в аварийном режиме

$$I_{\text{дл.разр}} = I_{\text{пост}} + I_{\text{ав}}.$$

Расчетный ток кратковременного разряда

$$I_{\text{кр.разр}} = I_{\text{дл.разр}} + I_{\text{вкл}},$$

где $I_{\text{вкл}}$ — ток, потребляемый приводом при включении выключателя (для наиболее мощного привода, в некоторых случаях — одновременно двух или трех приводов).

Емкость аккумуляторов должна быть выбрана так, чтобы была обеспечена надежная работа приводов выключателей в режиме заряда и в аварийных условиях (в конце аварийного режима) с учетом допустимых пределов отклонений напряжения от номинального. Падение напряжения в кабеле можно принимать равным 5 % номинального.

Номер N свинцового аккумулятора СК определяется из условия, учитывающего обеспечение расчетной емкости и расчетного тока длительного разряда:

$$N \geq 1,1 C_{\text{расч}}/C_{N=1},$$

где 1,1 — коэффициент, учитывающий уменьшение емкости батареи после нескольких лет эксплуатации; $C_{N=1}$ — емкость аккумулятора СК-1 при длительности разряда, равной принятой длительности аварии:

$$C_{N=1} = 18,5 \text{ А} \cdot \text{ч при } t_{\text{ав}} = 1 \text{ ч};$$

$$C_{N=1} = 22 \text{ А} \cdot \text{ч при } t_{\text{ав}} = 2 \text{ ч}.$$

В большинстве случаев на электростанциях для стационарных батарей применяют свинцовые кислотные аккумуляторы типов СК-42—СК-36. Все более широкое применение по-

лучают аккумуляторы типа СН, которые при соответствующей емкости имеют меньшие размеры и массу. Кроме того, эти аккумуляторы производятся в закрытом исполнении, поэтому испарение воды и унос электролита минимальны и доливка воды производится редко.

Установка аккумуляторных батарей. Аккумуляторные батареи должны устанавливаться в специально предназначенных для них помещениях, выполненных из негорючих материалов. Вход в аккумуляторное помещение должен осуществляться через тамбур. Обычно аккумуляторные батареи размещают в первом этаже щитового блока станции или подстанции.

Температура аккумуляторного помещения на уровне расположения аккумуляторов в холодное время года не должна быть ниже $+15^{\circ}\text{C}$. Отопление и вентиляцию рекомендуется осуществлять в виде калориферного устройства, располагаемого вне аккумуляторного помещения и подающего теплый воздух в вентиляционный канал.

При установке свинцовых аккумуляторов типа СК потребный объем свежего воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$, определяется по формуле

$$V = 0,07 I_{\text{зар}} n,$$

где $I_{\text{зар}}$ — максимальный зарядный ток аккумулятора, А; n — число аккумуляторов в батарее.

Аккумуляторы устанавливаются на стеллажах, изготовленных из сосновой древесины отборного сорта (влажность древесины должна быть не более 15 %). Длина стеллажей должна быть не более 6 м.

Двухъярусные стеллажи применяются лишь при стесненных помещениях для типов не более СК-5.

Аккумуляторные батареи должны иметь проходы для обслуживания шириной не менее 1 м при двустороннем расположении аккумуляторов и не менее 0,8 м при одностороннем расположении. Расстояние между сосудами и стенами должно быть не менее 150 мм.

Для ошиновки аккумуляторных батарей должны применяться голые медные и стальные шины; соединения стальных шин должны выполняться сваркой, медных — сваркой или пайкой. Расстояния между токоведущими частями, а также от них до частей здания и других заземленных частей должны быть не менее 50 мм в свету. Пролет между опорными точками шин должен быть не более 2 м. Изоляторы, их арматура, крепления шин, выводная плита из аккумуляторного помещения должны быть электрически и механически стойки к длительному воздействию паров и газов. Шины и металлические конструкции в помещении со свинцовыми кислотными аккумуляторами окрашиваются кислотоупорной краской: плюс (+) — цветом бордо, минус (—) — синим цветом.

Список литературы

- 33.1. ГОСТ 15596-82. Источники тока химические. Термины и определения.
- 33.2. Багоцкий В. С., Скундин А. М. Химические источники тока. М.: Энергоиздат, 1981. 360 с.
- 33.3. Коровин Н. В. Новые химические источники тока. М.: Энергия, 1978. 194 с.
- 33.4. Романов В. В., Хашев Ю. М. Химические источники тока. М.: Советское радио, 1978. 263 с.
- 33.5. Дасоян М. А. Химические источники тока. Л.: Энергия, 1969. 587 с.
- 33.6. Лидоренко Н. С., Мучник Г. Ф. Электрохимические генераторы. М.: Энергоиздат, 1982. 448 с.
- 33.7. Коровин Н. В. Электрохимические генераторы. М.: Энергия, 1974. 194 с.
- 33.8. ГОСТ 12.2.00712-75. Система стандартов безопасности труда. Источники тока химические. Требования безопасности.
- 33.9. Прейскурант № 15-11. Оптовые цены на источники тока химические. М.: Прейскурантиздат, 1980.
- 33.10. Дополнительные прейскуранты № 15-11-1980/5, № 15-11-1980/6. Прейскурантиздат, 1982.
- 33.11. Зорохович А. Е., Бельский В. П., Эйгель Ф. Н. Устройство для заряда и разряда аккумуляторных батарей. М.: Энергия, 1976. 208 с.
- 33.12. Устинов П. И. Стационарные аккумуляторные установки. М.: Энергия, 1970. 312 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Автодутье 443, 444, 445
Автоматизированные системы проектирования:
асинхронных двигателей 269—271
машин автономной энергетики 272—273
турбогенераторов 271
Автоматические выключатели (автоматы):
автоматы гашения поля 567, 568
— защиты 567, 568—570
быстродействующие (БАБ) 567
на повышенные частоты 572
с тепловым расцепителем 570, 571, 572
— электромагнитным расцепителем 570, 571
Автономные преобразователи 617, 620
Автотрансформаторы:
обозначения 181, 213
определение 181
силовые 193
схема замещения 192
схемы включения 192
Активная часть трансформатора 183
Активное сопротивление обмоток электрических машин 265, 266, 273—281, 317, 318
Активные фильтры 114
Аккумуляторы и батареи:
авиационные 696
воздушно-металлические 699
кислотные 693—694
никель-водородные 698
никель-железные 697—698
никель-кадмиевые 697—698
никель-цинковые 699
применение на электростанциях и подстанциях 700—701
с твердыми и расплавленными электролитами 699
свинцовые 694, 695, 696
серебряно-цинковые 698
стартерные 696
устройства для заряда 699—700
щелочные 696—697
Алгебра логики 117—118
Амплитудное и амплитудно-фазовое управление асинхронными исполнительными двигателями 409
Аппаратурная реализация логических зависимостей 120—121
Арматура кабельная 36—45
Асинхронизированные синхронные двигатели 294
Асинхронные генераторы 291
Асинхронные двигатели:
автоматизированные системы проектирования 269—271
базовые значения параметров 281
главные размеры 277—278
исполнительные см. Исполнительные двигатели асинхронные
крановые и металлургические 359—361
многоскоростные 275, 354
пусковые характеристики 290
с глубоким пазом ротора 275, 290
с двойной клеткой 275, 290
— короткозамкнутым ротором 275
— массивным ротором 275
— пазами ротора специального профиля 290
— фазным ротором 275
стандарты 277
требования 277
трехфазные единой серии АН-2 и АКН-2 мощностью свыше 1000 кВт 343
— основные серии 344—345
— серии АН 355—359
— — 4А модернизированные 356, 359
— — — мощностью 0,06—400 кВт 345—352
— — — основное исполнение 350—352, 356
— — — специальные исполнения 352—355
характеристики пусковые 290
— рабочие 289
Асинхронные машины:
векторная диаграмма 284
генераторы 291
вращающие моменты 286
двигатели см. Асинхронные двигатели
коэффициент полезного действия 287
круговая диаграмма 287—289
механическая характеристика 286
мощности 285
потери в обмотках 287
— — стали 286—287
— добавочные 287
— механические 287
преобразователи частоты 291—292
принцип действия 276—277
скольжение 276
стандарты 277
схема замещения 284
тахогенераторы 428—429
требования 245
трехфазные индукционные регуляторы 292—293
устройство 275, 276
фазорегуляторы 292
Асинхронный пуск генераторов 325

Б

- База 95, 96
Бездуговые контакторы 563
Беличья клетка 256
Бесконтактные аппараты управления 576—582
— двигатели постоянного тока 404—406
— исполнительные двигатели 419—420
— пускорегулирующие устройства 581
— сельсины 431, 432, 433—434
Беспазовый якорь 415—417
Бесщеточные системы возбуждения синхронных машин 297
Биметаллические элементы 570, 572
Блоки резисторов 136—139
Большие интегральные микросхемы см. Интегральные микросхемы с повышенной степенью интеграции

В

- Вводы 89—90
Векторные диаграммы:

- асинхронных машин 284
- синхронных машин 320, 321, 322
- трансформатора 185, 190
- напряжения 526, 528
- тока 500
- Вентили электрические 620
- Вибрация якоря электромагнита 547
- Винтовые обмотки трансформаторов 204—205
- Внешние характеристики выпрямителей 621
- — синхронных генераторов 322—323
- Внешняя и внутренняя изоляция 72—73
- Внутренние перенапряжения 73
- Водородное охлаждение 299—300, 301, 302
- Возбуждение машин постоянного тока 334, 335
- синхронных машин 296—297
- Волновые обмотки электрических машин 250, 253, 254
- Восстанавливающееся напряжение 466—470
- Вращающееся магнитное поле 256—257
- Вращающие моменты асинхронных машин 286
- — машин постоянного тока 339
- Время срабатывания, трогания и отпускания электромагнита 547, 548
- Выключатели:
 - автогазовые 442
 - автоматические *см.* Автоматические выключатели
 - баковые 443—445, 446, 447, 475, 476, 477
 - вакуумные 458—459, 481, 482
 - воздушные 454, 455, 478—479, 480
 - особенности расчета 464—465
 - восстанавливающееся напряжение 466—470
 - горшковые 442
 - испытательные напряжения 444, 445
 - маломасляные 445, 446, 447—449, 472—475
 - масляные 443—445, 446, 447, 475, 476, 477
 - нагрузки 476, 477—478
 - пакетные 576
 - параметры номинальные 441—443
 - приводы 482—486
 - прочность изоляторов вводов 464
 - путевые 575, 576
 - расчет и выбор контактов 459—461
 - токоведущих стержней 459
 - траверсы 463—464
 - электродинамических сил 462—463
 - элегазовые 453, 454, 456—457
 - электромагнитные 457—458, 479, 480, 481, 482
- Выпрямители:
 - внешняя характеристика 621
 - коэффициент мощности 621
 - пульсаций 621
 - многофазные схемы выпрямления 630—632
 - неуправляемые трехфазные 625—629
 - однополупериодные схемы выпрямления 622—623
 - однофазные двухполупериодные схемы выпрямления 623
 - мостовые несимметричные 636
 - пульсации 624
 - с идеальными вентилями и трансформаторами 621
 - нулевым вентилем 635
 - фазовым управлением 629—630
 - сглаживающие фильтры 624—625
 - структурная схема 621
 - схемы с умножением напряжения 625
- Выпрямительные диоды 109, 620
- — силовые 109, 618

Г

- Гашение дуги 443
- Генераторы импульсных напряжений (ГИН) 155
- Герконы *см.* Магнитоуправляемые контакты
- Гистерезисные двигатели 294, 390, 392
- Грозовые перенапряжения 73
- Группы соединения обмоток трансформатора 188, 189

Д

- Датчики:
 - емкостные 585
 - индуктивные 582—583
 - резистивные 584—585
 - трансформаторные 584
- Двухслойные обмотки электрических машин 249—253
- Делители напряжения конденсаторные 152
- Демпферные обмотки 313—314
- Дешифраторы 121
- Динисторы 104
- Дисковые якоря 418, 419
- Допустимые температуры кабелей 29
- токи нагрузки кабелей 28—36
- Дугогасительные устройства 557—561
- З
- Заградители высокочастотные 534
- Заделки кабельные 36
- Запоминающие устройства 123, 126—127
- Зарядная мощность синхронных генераторов 323
- Защита полупроводниковых преобразователей от аварийных токов 674—676
- — — перенапряжений 672, 673

И

- Изоляторы переменного тока высокого напряжения:
 - вводы на 110 кВ и выше 89—90
 - испытательные напряжения 74
 - классификация 83—84
 - линейные 91—94
 - полимерные 93—94
 - стержневые 91
 - тарельчатые 91, 92
 - штыревые 91
 - опорные 84—86
 - стержневые 85, 86
 - штыревые 85, 86
 - проходные 86—89
- Изоляция:
 - в трансформаторах 198—202
 - вольт-временные характеристики 73
 - длительная электрическая прочность внутренней изоляции 73
 - кратковременная электрическая прочность при грозовых перенапряжениях 73
 - — — внутренних перенапряжениях 73
 - обмоток электрических машин 239—240
 - требования к электрической прочности 73—75
 - расчет механической прочности 81
 - электрической прочности типовых электроизоляционных промежутков 75
- Инверторы:
 - автономные 666—668
 - ведомые 632—633
 - напряжения 661—663
 - резонансные 668—672

- тока 657—661
 - модифицированные 661
- широтно-импульсная модуляция и регулирование 649, 663—664
- Индикаторный режим сельсинов 434—435
- Индуктивные сопротивления обмоток электрических машин 267—269, 313—317, 328, 329, 330
- Индуктор электрической машины 296
- Индукторные генераторы 293
- Индуктоины 440
- Индукционные регуляторы 292—293
- Интегральные микросхемы с повышенной степенью интеграции 125
- Исполнительные двигатели:
 - асинхронные 408—413
 - с короткозамкнутым ротором 411, 412, 413
 - — полым немагнитным ротором 410—411, 412
 - — ферромагнитным ротором 412, 413
 - характеристики 410
 - постоянного тока 413—420
 - — бесконтактные 419—420
 - шаговые 420—423
- Испытательные напряжения:
 - выключателей 444, 445
 - изоляторов 74
 - реакторов 169
 - трансформаторов 199
 - напряжения 529, 531
 - тока 504

К

- Кабели:
 - гибкие 55, 56, 57—58
 - контрольные 5—6, 45, 47, 48
 - монтажные 58, 59
 - радиочастотные 6
 - связи 5
- Кабели силовые:
 - ассортимент 20—23
 - допустимые кратковременные перегрузки 34
 - температуры нагрева 29—30
 - токи нагрузки 28—36
 - конструкция 16—18
 - маркировка 18
 - муфты 36—45
 - номенклатура 19—20
 - способы прокладки 25—28
 - электрические характеристики 23—25
- Кабели управления 6, 47, 48—51, 58
- Кабельные вводы 45
 - изделия 5
 - цены 67, 68—71
- Карты Карно 118, 119
- Катушечные обмотки 206
- Качания синхронных машин 326—327
- Класс точности трансформаторов напряжения 527, 532
 - — — тока 511
- Коллектор 96
- Коллекторные микродвигатели 402—404
 - трехфазные двигатели 230, 406—407
- Коллекторы машин постоянного тока 333
- Командоаппараты 574, 575
- Коммутационные узлы 651—655, 665—666
- Компараторы 115
- Конденсаторные установки 148, 149
- Конденсаторы:
 - демпфирующие 158—159

- для емкостной связи 150—152
- преобразовательных установок 155—157
- электроустановок переменного тока 147—149
- импульсные 153—155
- компенсирующие 156—157
- коммутирующие 155
- косинусные 146, 147—150
- повышенной частоты 149—150
- фильтровые 152—153
- Конструктивное исполнение электрических машин 230
- Контактные материалы 550—551, 552
- Контакты:
 - на повышенные частоты 572
 - переменного тока 563, 564, 565
 - постоянного тока 563
- Контакты:
 - аппаратов низкого напряжения 549—551, 554—555
 - выключателей высокого напряжения 459—462
 - жидкометаллические 553
 - электрический износ 556
- Контроллеры 575
- Концентрические обмотки 184
- Концы валов электрических машин 242—243
- Короткое замыкание трансформатора 186—187
- Короткозамыкатели 491
- Косвенное водородное охлаждение 299—300, 301, 302
- Коэффициент возврата электромагнитного механизма 547
 - мощности вентильного преобразователя 633—634
 - — — улучшение 634—635
 - — — выпрямителя 621
 - насыщения зубцового слоя 282
 - стальных участков магнитной цепи 283
 - полезного действия асинхронной машины 287
 - — — машины постоянного тока 342
 - — — синхронной машины 331, 332
 - — — трансформатора 187—189
 - — — электрической машины 235, 240
 - пульсаций выпрямленного напряжения 621
 - распределения 258
 - скоса пазов 258
 - увеличения сопротивления обмоток 265
 - укорочения шага 258
 - усиления магнитного усилителя 577
 - формы поля возбуждения 310
 - эрозии контактных материалов 556
- Крановые и металлургические двигатели 359—361, 398—399

Л

- Линейные изоляторы 91—94
- Логические интегральные микросхемы 116—130
 - функции 117, 118
 - элементы 120—121
- Лягушечьи обмотки 255
- М**
- Магнесины 436—437
- Магнитная цепь асинхронной машины 281—283
 - — машины постоянного тока 337—338
 - — синхронной машины 318—320
 - — электрической машины 281

Магнитно-вентильные разрядники 497
 Магнитное дутье 557
 — поле синхронной машины 310—313
 Магнитные проводимости зазоров 540—543
 — системы трансформаторов 182, 183, 184, 209—212
 — сопротивления магнитопроводов 543—544
 Магнитные усилители:
 классификация 576, 577
 коэффициенты усиления 577
 параметры 576, 577
 расчет 577—579
 характеристика управления 577
 Магнитопроводы трансформаторов 184
 Магнитоуправляемые герметизированные кон-
 такты 591, 592
 — — — применение 592—597
 Математическое моделирование электрических
 машин 273—274
 Машинная постоянная 246
 Машины постоянного тока:
 вращающие моменты 339
 генераторы 334, 395
 двигатели 334, 395
 — бесконтактные 404—406
 — единой серии 2П 396—398
 — металлургические и крановые 398—399
 коэффициент полезного действия 342
 микродвигатели *см.* Микродвигатели кол-
 лекторные постоянного тока
 обмотки 253—255
 потери 341—342
 принцип действия 333
 расчет магнитной цепи 337—338
 серии 395
 сопротивление обмотки 336—337
 стандарты 335
 схемы возбуждения 334, 335
 тахогенераторы 429—430
 типы 334, 335
 требования 335
 уравнение напряжений 339
 устройство 332—333
 характеристика внешняя 339, 340, 341
 — короткого замыкания 340
 — механические 341
 — нагрузочная 340, 341
 — намагничивания 337
 — переходные 337
 — регулировочная 339, 340, 341
 — холостого хода 338
 — электромеханическая 341
 Механическая постоянная времени асинхрон-
 ной машины 330
 Механические силы в обмотках трансформато-
 ров 208
 — характеристики асинхронных машин 286
 Микровыключатели 575
 Микродвигатели:
 асинхронные 361—371
 — однофазные 363—367
 — трехфазные 362—363
 — универсальные 367, 370
 коллекторные переменного тока 402—403
 — постоянного тока 400—402
 — универсальные 403—404
 постоянного тока бесконтактные 404—406
 синхронные 381—393
 — гистерезисные 390—391
 — реактивные 391—392
 — с постоянными магнитами 384—385
 — тихоходные 385—390

Микропроцессоры 127, 130
 Микросхема 125
 Микро-ЭВМ 128—130
 Минимизация логических выражений 118
 Мультивибраторы 115—116
 — заторможенные *см.* Одновибраторы
 Мультиплексоры 125
 Муфты кабельные 36—42

Н

Нагрузочная способность трансформаторов
 212—213
 Нелинейные ограничители перенапряжений 497
 Непосредственное охлаждение синхронных ма-
 шин 300, 303—307
 Несимметричные короткие замыкания на вы-
 водах синхронных машин 224
 Неявнополюсные электрические машины 229

О

Обмотки возбуждения 255—256
 — трансформаторов 183, 184, 204—205, 206
 — электрических машин 246—255, 256
 — электромагнитов 545—546
 Обмоточные коэффициенты 258
 Ограничители напряжений на операционных
 усилителях 114—115
 — перенапряжений 498
 Одновибраторы 115—116
 Однослойные обмотки электрических машин
 249
 Операционные усилители 110, 111, 112
 Опорные изоляторы 84—86
 Оптико-электронные трансформаторы напря-
 жения 531—532
 — — — тока 513—515
 Оптоэлектронные приборы 106—107
 Оптроны 107
 Отделители 491—492
 Отношение короткого замыкания 323

П

Параллельная работа синхронных машин 325,
 326
 — — трансформаторов 189
 Первичные химические источники тока:
 резервные 689, 690
 с водными растворами электролитов 685—
 689
 — неводными растворами электролитов
 690
 — расплавленным электролитом 691
 — твердыми электролитами 691
 Перегружаемость синхронных машин 326
 Переключатели 574, 576
 — круговые на базе герконов 592
 — тиристорные малоомные 581
 Переходное восстанавливающееся напряжение
 470—471
 Переходные параметры синхронных машин
 329—330
 Петлевая обмотка 249, 251, 253, 254
 Пневматические приводы 483—484, 485
 Пневмогидравлические приводы 484, 485
 Погрешности трансформаторов напряжения
 526—527, 529, 530
 — — — тока 501—502, 509, 510
 — — — при глубоком насыщении 509, 510
 — — — уменьшение 502—503, 508—509
 Полупроводниковые диоды 95—96, 108, 109,
 618, 620
 — реле 580—581, 597—600

- Самосинхронизация 325
 Сверхпереходные параметры синхронных машин 329—330
 Светоизлучающие приборы 107
 Сельсины:
 бесконтактные 431, 432, 433—434
 дифференциальные 435—436
 индикаторный режим 434—435
 контактные однофазные 431, 432
 магнесины 436—437
 трансформаторный режим 435
 Симисторы 110
 Синхронизация 324—325
 Синхронные генераторы:
 внешние характеристики 322—323
 гидрогенераторы 293, 306—307, 308—309
 — основные типы 371—372, 376, 377
 — — требования 298
 — перспективные типы 383
 — стандарты 299
 зарядная мощность 323
 индукторные генераторы 293
 несимметричное короткое замыкание на выводах 324
 общего назначения 372, 377, 378, 379, 380
 основные типы 372, 378, 379, 380—381
 отношение короткого замыкания 323
 реактивный треугольник 323
 регулирующая характеристика 323
 самосинхронизация 325
 симметричное трехфазное короткое замыкание на выводах 323—324
 — — — ток 323
 — — — ударный 323
 синхронизация 324—325
 синхронные компенсаторы 291, 299, 300, 302, 309, 370
 — — основные типы 372, 376, 377, 378
 — — перспективные типы 383
 турбогенераторы 271, 293, 300—306, 309
 — единая серия 381
 — основные типы 371, 373—376
 — требования 298
 — перспективные типы 381—383
 — — криогенный 382—383
 — стандарты 299
 Синхронные двигатели 293—294, 327—328, 373, 377, 380—381
 — с редукцией частоты вращения 393—394
 — микродвигатели см. Микродвигатели синхронные
 Синхронные машины:
 асинхронный пуск 325
 векторные диаграммы 320, 321, 322
 генераторы см. Синхронные генераторы
 главные размеры 307—308
 двигатели см. Синхронные двигатели качения 326—327
 коэффициент полезного действия 331, 332
 — приведения роторных контуров 314—315
 параллельная работа с энергосистемами 325—326
 перегружаемость 326
 постоянные времени 328, 329, 330
 потери 330, 331, 332
 принцип действия 295—296
 расчет магнитных цепей 318—320
 с косвенным охлаждением 299—300
 — непосредственным охлаждением 300—307
 система относительных единиц 314—315
 системы возбуждения 296—297
 сопротивления активные 317—318
 — индуктивные 315—317, 328, 329, 330
 способы синхронизации 324—325
 стандарты 297, 298, 299
 тахогенераторы 427
 типы 293—294
 требования 297—299
 угловые характеристики 325
 эквивалентирование демпферной обмотки 313—314
 Система относительных единиц 280—281
 Система управления вентилями преобразователями 645—648
 Скольжение асинхронных машин 276
 Скорость нарастания напряжения возбуждения 296
 Стабилизаторы напряжения на операционных усилителях 113—114
 — — электромагнитные 581—582
 Стабилизация напряжения трансформатора 193—194
 Стандарты на трансформаторы 222
 — электрические машины 245, 277, 297—299, 335
 Станции управления 581
 Степень искрения 236—237
 Стержни магнитопроводов трансформаторов 195—197, 209, 210
 Сумматоры 113
 Сухие трансформаторы 183, 200, 219, 220
 — — напряжения 533
 Схема замещения асинхронной машины 284
 — — магнитной цепи 544—545
 — — трансформатора 185, 187, 191, 192
 Схемы с памятью 124—125
 Счетчики 122—123
- Т**
- Тахогенераторы:
 асинхронные 428—429
 выходные характеристики 427
 постоянного тока 429—430
 синхронные 427
 Термическая стойкость:
 аппаратов низкого напряжения 555
 трансформаторов тока 500, 501, 502
 Тирсторные пускатели 567
 Тиристоры:
 диодные см. Динисторы
 силовые 109—110, 619—620
 симметричные 106, 110
 триодные 105—106
 Тихоходные синхронные двигатели с редукцией частоты вращения 393—394
 Токи короткого замыкания синхронных машин 323
 Токоведущие части аппаратов 551—555
 Топливные элементы 683, 685, 691, 692
 Транзисторы:
 биполярные 96, 97, 98, 100—103, 107
 полевые 98—100, 103—104
 — МДП 99—100
 Трансформаторы:
 активная часть 183
 броневые 184
 векторная диаграмма 185, 186, 190
 выбор конструкции 203
 группы соединений обмоток 188, 189
 для сетей 10—500 кВ 219—220
 изоляция 198, 200, 201, 202

- испытательные напряжения нормируемые 199
классификация 183—184
короткое замыкание 186—187
коэффициент полезного действия 187—189
магнитная система 182, 183, 184, 209—212
нагрузочная способность 212—213
номинальные данные 182
несимметричная нагрузка 189
обмотки 183, 184, 204—205, 206
обозначение 182, 183, 213
определение 181
опыт короткого замыкания 186—187
основные части 183
охлаждение 183
параллельная работа 189
перегрузка 213
потери короткого замыкания 206, 207
— холостого хода 210, 211
работа под нагрузкой 184—185
расчет 194—198, 203—204, 204—205, 205—206
регулирование под нагрузкой 193, 194
режим короткого замыкания 186, 208
— холостого хода 185—186
с расщепленными обмотками 191
стабилизация напряжения 193—194
стандартизация 222
стержневые 184
сухие 183, 200, 219, 220
схемы замещения обмоток 185, 187, 190, 191, 192
Трансформаторы вращающиеся 437—440
— малой мощности 182, 220—222
Трансформаторы напряжения:
векторная диаграмма 526, 528
выбор основных параметров 528—529
испытательные напряжения 529, 531
каскадные 530—531
класс точности 527, 532
конденсаторные 531
номинальные параметры 525
оптико-электронные 531—532
погрешности 526—527, 529, 530
сухие 533
схемы включения 527—528
Трансформаторы тока:
быстронасыщающиеся 516, 517
векторная диаграмма 500
выбор параметров 503—507
для наружной установки 520, 521, 522, 523, 524, 525
испытательные напряжения 504
каскадные 512—513
катушечные 515, 516, 518, 523, 524
класс точности 511
лабораторные 519, 521
магнитные 513
номинальные параметры 500, 501, 502
нулевой последовательности 521, 523
опорные 515, 516, 517, 518
— шинные 517, 520, 521
опорно-проходные 516, 517, 518
оптико-электронные 513—515
погрешность 500—502
— при глубоком насыщении 509, 510
— уменьшение 502—503, 508—509
проходные 515, 516, 517, 518, 519, 520, 523, 524
— шинные 517, 519, 520, 521
термическая стойкость 500, 501, 502
шинные встроенные 519, 520, 521
электродинамическая стойкость 501, 502
Триггеры и триггерные устройства 121—122
Туннельные диоды 97
- У**
- Угловая характеристика синхронной машины 325
Ударный ток короткого замыкания 323—324
Умножение напряжения 625
Универсальные асинхронные микродвигатели 367, 370—371
— двигатели 403—404
Уравнительный ток реверсивного преобразователя 641—642
- Ф**
- Фазовое регулирование выпрямленного напряжения 629—630
— управление исполнительными двигателями 409
Фазорегуляторы 292
Фильтры сглаживающие 624—625
Форма пазов 247—248
Фотодиоды 107
Фототранзисторы 106
Фотоэлементы вентильные 107
- Х**
- Характеристика короткого замыкания генератора 323
Характеристики генераторов постоянного тока 339—341
— двигателей постоянного тока 341
— намагничивания синхронных машин 320
— холостого хода синхронных машин 320
— управления магнитных усилителей 577
Характеристический треугольник машин постоянного тока 338, 339
Химические источники тока:
вторичные см. Аккумуляторы и батареи
емкость 684—685
мощность 684—685
первичные 682
поляризация 683—684
разрядное напряжение 684
сопротивление 683—684
топливные элементы 683, 685, 691, 692
электродвижущая сила 683
электрохимическая система 682
электрохимические генераторы 683, 692, 693
— энергоустановки 683, 692
энергия 684—685
Холостой ход трансформатора 185—186
- Ц**
- Цилиндрические обмотки трансформаторов 204, 206
- Ч**
- Частота вращения электрических машин 241, 242
Чередующиеся обмотки 184
- Ш**
- Шаблонные обмотки электрических машин 249
Шаг катушки обмотки электрических машин 247

Шаговые двигатели 420—423

Шины и ленты 12—13

Широтно-импульсная модуляция и регулирование 649, 663, 664

Шнуры соединительные 54—55

Э

Электрическая прочность изоляции 73—75

— — изоляционных промежутков 75—78

Электрические машины:

высота оси вращения 242

главные размеры 245

исполнения конструктивные 228, 229, 230

испытания 243—244

классификация 225, 230, 233

коэффициент искажения синусоидальности 235

— полезного действия 235, 240

математическое моделирование 273—274

машинная постоянная 246

мощность расчетная 245—246

нагрузка 234

надежность 244

невянополюсные 229

номинальные параметры 233, 234, 235, 241—242

номинальный режим работы 233—234

обозначение выводов 240—241

обмотки 246—256

общие технические требования 233

определение 225

охлаждение 231—234

перегрузка 235

потери мощности 240

превышения температуры предельно допустимые 237—238

сопротивление изоляции обмоток 240

— обмоток активное 265, 266, 278—281, 317, 318

— — индуктивное 267—269, 313—317, 328, 329, 330

стандарты 245

степень искрения 236—237

технико-экономические показатели 246

технические требования 235—237

частоты вращения 241—242

явнополюсные 229

Электрический вал 430, 431

— износ контактов 556

Электродинамическая стойкость трансформаторов тока 501, 502

Электромагниты:

данные 613

грузоподъемных устройств 607

конструкции 613, 614

области использования 600—601

обмотки 545—546

методы расчета 601—606

Электромашинные усилители:

классификация 423

коэффициент добротности 424

— усиления 424

поперечного поля 425—426

с независимым возбуждением 424

— самовозбуждением 424

степень форсировки 424

Электрохимическая система химического источника 682

Электрохимические генераторы 683, 692, 693

— энергоустановки 683, 692

Элементы И, ИЛИ, НЕ 120

Эмиттер 96

Эрозионные свойства контактов 551, 556

Эталонные источники магнитного поля 614—616

Я

Явнополюсные электрические машины 229

Якорные обмотки машин переменного тока 247—253

— — — постоянного тока 253—255

Якорь машин постоянного тока 333

Ярмо трансформатора 195, 209

Ячейка Керра 531, 532

— Поккельса 531, 532

— Фарадея 514

Замеченные опечатки к т. 1

исправлены

Страница	Колонка	Строка	Напечатано	Должно быть
27 (табл. 2.4)	8-я графа	1-я сверху	10^{17}	10^7
33	6-я графа	9-я сверху	$3 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^9$
34	5-я графа	8-я сверху	Не напечатано	Н
37	Левая	3-я снизу	Дж (К · моль)	Дж / (К · моль)
89	Правая	3-я снизу	$= ZI_z + NO - E$	$ZI_z + NU_y - E$
112	Левая	16-я снизу	...теореме расположения	...теореме разложения
140	Левая	27-я сверху	$E \cdot dI = 0$	$E \times dI = 0$
141	—	10-я снизу (по левой колонке)	$\text{rot rot } \mathbf{F} = \nabla \times (\nabla \mathbf{F}) =$	$\text{rot rot } \mathbf{F} = \nabla \times (\nabla \times \mathbf{F}) =$
145	Правая	18-я сверху	$k \ll 1$	$k \leq 1$
229	Правая	2-я сверху	нома ¹ :	нома:
232	Правая	7-я снизу	ЭВМ) — с численной	ЭВМ) — о численной
460	Левая (подпись к рис. 16.34)	3-я сверху	3 — БНДК24, 5 — БНДК25БА, 6 — БНДК25А	3 — ЮНДК24; 5 — ЮНДК25БА; 6 — ЮНДК25А

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК. Т. 2.
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ И УСТРОЙСТВА**

Редактор И. В. Антик

Художественный редактор *В. А. Гозак-Хозак*

Технический редактор *Н. П. Собакина*

Корректор *М. Г. Гулина*

ИБ № 1075

Сдано в набор 21.11.85. Подписано в печать 14.04.86. Т-09256. Формат 70×108^{1/16}. Бумага кн.-журн. имп. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 62,3. Усл. кр.-отт. 62,3. Уч.-изд. л. 90,09. Тираж 90 000 экз. Заказ 375. Цена 5 р. 10 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600000, г Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

