ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК

1

ЭЛЕКТРО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК

1

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

ТОМ I

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

МОСКВА·ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ·1985

ББК 31.2
Э45
УДК 621.3(035.5)

Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 1.
Э45 Общие вопросы. Электротехнические материалы/
/Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. — 7-е изд., испр. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 488 с.: ил.

В пер.: 3 р. 70 к. 90 000 экз.

Приведены сведения по теоретическим основам электротехники, электрофизике проводников, полупроводников, диэлектриков и ферромагнетиков, общим вопросам электрооборудования, технике безопасности, измерениям электрических и магнитных величин, применению вычислительной техники и моделированию в электротехнике и электроэнергетике. Даны основные правила оформления конструкторской документации и сведения по контролю качества электротехнических материалов и изделий. Предыдущее шестое издание справочника выпущено в 1980 г.

Рассчитан на широкий круг инженеров-электриков.

Э $\frac{2302000000\text{-}073}{051(01)\text{-}85}$ 54-85 ББК 31.2

© Энергоатомиздат, 1985

ПРЕДИСЛОВИЕ К СЕДЬМОМУ ИЗДАНИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО СПРАВОЧНИКА

Седьмое издание «Электротехнического справочника» выходит в свет в тот период, который XXVI съезд КПСС охарактеризовал, как новый крупный этап в развитии материально-технической базы нашего общества на основе ускорения научно-технического прогресса, интенсификации общественного производства, повышения его эффективности. При этом подчеркивалось, что одной из безусловных предпосылок решения всех народнохозяйственных задач является развитие таких базовых отраслей индустрии, как топливно-энергетические. Определяющая роль энергетики и электрификации страны нашла свое яркое отражение в разработке Энергетической программы СССР на длительную перспективу.

Реализация Энергетической программы обеспечит создание необходимых условий для ускорения перевода экономики страны на интенсивный путь развития, позволит существенно увеличить энерговооруженность отраслей народного хозяйства, обеспечит прогрессивные структурные сдвиги в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте. Наряду с проведением активной энергосберегающей политики, в первую очередь за счет создания и широкого внедрения энергосберегающей техники и совершенствования технологий во всех звеньях народного хозяйства и в быту, программа предусматривает опережающие темпы роста производства электроэнергии. Это будет достигнуто форсированным строительством крупных атомных электростанций в европейской части страны, освоением гидроэнергетических ресурсов Сибири, Дальнего Востока и Средней Азии, ускоренным развитием тепловых электростанций на органическом топливе в восточных районах, особенно на базе Экибастузского и Канско-Ачинского топливно-энергетических комплексов.

Предусмотрено завершение формирования Единой электроэнергетической системы СССР, заметное повышение надежности и качества электроснабжения предприятий промышленности, транспорта и сельскохозяйственного производства. Получат дальнейшее развитие межсистемные электрические связи за счет строительства линий электропередач переменного тока напряжением 750 и 1150 кВ (в том числе линия Сибирь—Казахстан—Урал), а также постоянного тока напряжением 1500 кВ (в первую очередь, Экибастуз—Центр).

Энергетическая программа СССР, предусмотренное ею развитие электроэнергетики и электрификации ставят новые большие задачи перед электротехнической промышленностью страны. Увеличится производство турбо- и гидрогенераторов, электрооборудования для линий электропередач, электрических машин, аппаратов и электроприводов для различных отраслей народного хозяйства, мощных электровозов, силовой полупроводниковой преобразовательной техники и пр. Новый уровень развития энергетической техники потребуют также создания и производства быстродействующих управляющих и вычислительных комплексов, электронных устройств контроля и регулирования, систем комплексной автоматизации, измерительно-информационной техники и автоматизированных систем управления, использующих новейшие достижения микроэлектроники, оптоэлектроники, робототехники и лазерной техники.

Осуществление всех задач, поставленных перед электроэнергетической и электропромышленностью «Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1981—1985 гг. и на период до 1990 г.» и Энергетической программой СССР на длительную перспективу, возможно только при условии повышения уровня подготовки инженерных кадров в области электротехники и электроэнергетики, овладения ими новой техникой, в том числе современными вычислительными средствами, открывающими возможность решения самых сложных задач и повышения эффективности самого инженерного труда. Широкое использование вычислительной техники стимулирует разработку новых методов анализа, расчета, исследования, проектирования и создания перспективных технических решений в электротехнике и электроэнергетике.

Для подготовки инженерных кадров высокой квалификации нужны современные учебники и учебные пособия, в том числе и справочники. Редколлегия «Электротехнического справочника», готовя очередное седьмое издание, решила существенно пересмотреть его содержание с тем, чтобы он не только дал возможность получить сведения на современном уровне, но и направлял читателя к использованию новых средств и методов решения технических задач.

Назначение и направленность справочника (первое издание вышло в 1952 г.) остались прежними — он должен служить учебным пособием преимущественно для курсового, а отчасти и для дипломного проектирования студентов электроэнергетических и электротехнических специальностей и настольной справочной книгой для широких кругов инженеров-электриков. Полученные отклики и отзывы читателей свидетельствуют о том, что прежние издания справочника в целом удовлетворительно решили эти задачи.

Материалы предыдущего издания были подвергнуты значительной переработке, существенно обновлены и дополнены. Большую помощь редакторам и авторам Справочника оказали замечания и отзывы кафедр ряда вузов, промышленных организаций и отдельных лиц, часть из которых опубликована в печати [«Электротехника», 1983, № 6; «Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод», 1984, вып. 1 (123)]. Редакционная коллегия, пользуясь случаем, выражает всем им глубокую признательность; она максимально старалась учесть эти замечания и пожелания при работе над новым изданием. Это, несомненно, должно способствовать улучшению «Электротехнического справочника».

В новое издание справочника дополнительно вошли такие разделы, как «Электрификация народного хозяйства и развитие электротехнической промышленности страны», «Планирование, организация и автоматизация электротехнического эксперимента», «Моделирование в электротехнике и электроэнергетике», «Применение вычислительной техники в электротехнике и электроэнергетике», «Контроль качества электротехнических материалов и изделий». Включены также сведения о надежности электротехнического оборудования, метрологии и стандартизации, подробнее описаны данные серий электрических машин, источники вторичного электропитания и пр. Приняты меры по устранению устаревших и второстепенных сведений, исключению дублирования, более строгому распределению материалов по разделам. При подготовке нового издания справочника учтены изменения в стандартах, нормалях, руководящих указаниях, уточнены данные каталожного характера. Авторский коллектив попытался использовать также все возможности для приведения сведений о характеристиках и ценах материалов, оборудования, устройств и установок, еще не выпускаемых серийно, а только намечаемых к выпуску или сооружению. Авторы и редакторы разделов уделили внимание тому, чтобы придать материалу справочника более конкретную, краткую форму, большую систематичность, улучшить редакцию.

Авторский коллектив стремился к тому, чтобы методы расчета, рекомендации и показатели, приводимые в справочнике, побуждали читателей к всемерной экономии материальных и энергетических ресурсов, снижению массогабаритных показателей и удельных расходов, уменьшению потерь, в том числе потерь электрической энергии, повышению надежности конструкций, их ремонтопригодности, улучшению качества и снижению трудоемкости проектируемых объектов. Хотя справочник в основном предназначен в качестве пособия при проектировании в нем по возможности учитываются требования эксплуатации к разрабатываемым электротехническим устройствам и установкам.

Справочник выпускается в трех томах. В первом томе помещаются данные общего характера, а также основные сведения по электрофизике, электротехнике, электрическим и магнитным измерениям, организации и планированию электротехнического эксперимента, моделированию, применению ЭВМ в электротехнике и электроэнергетике, оценке эффективности новой техники и обеспечению безопасности электроустановок, о разнообразных электротехнических материалах, контроле качества материалов и изделий.

Во втором томе сосредоточены сведения по электротехническим устройствам и оборудованию: кабельным изделиям, изоляторам, полупроводниковым приборам, резисторам, конденсаторам, реакторам, электрическим аппаратам, трансформаторам, электрическим машинам, вентильным преобразователям, химическим источникам тока.

В первой книге третьего тома приводятся материалы по производству, передаче и распределению электрической энергии: по электрическим системам, распределительным устройствам, электрическим сетям, защите, автоматике, управлению и контролю в электрических системах, по электроснабжению городов, сельского хозяйства, промышленных предприятий и транспорта, а также данные о технико-экономических показателях в электроэнергетике.

Во второй книге третьего тома содержатся сведения по использованию электрической энергии в промышленности, на транспорте и быту; по автоматизированному электроприводу, электротермии и электросварке, электрическому транспорту, электрическому освещению, электробытовым приборам и электроинструментам и пр.

Авторами справочника, как и ранее, являются в основном профессора и преподаватели МЭИ. Материал, подготовленный авторами, просмотрен заведующими соответствующими кафедрами МЭИ. Перечень лиц, участвовавших в работе над справочником, приводится в начале каждого тома.

Составители справочника просят лиц, пользующихся новым изданием, сообщить о замеченных недостатках и о пожеланиях по улучшению или дополнению материала справочника по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная улица, д. 14, МЭИ, редакционной коллегии «Электротехнического справочника».

Редакционная коллегия

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к седьмому изданию электротехнического справочника . . . 3
Раздел 1. Развитие электроэнергетики, электрификации и электротехнической промышленности 7
Раздел 2. Единицы физических величин. Важнейшие физические постоянные . . 24
Раздел 3. Основные сведения по электрофизике 39
Раздел 4. Теоретические основы электротехники 74
Раздел 5. Планирование, организация и автоматизация электротехнического эксперимента 151
Раздел 6. Основы метрологии. Измерение электрических и магнитных величин . 174
Раздел 7. Моделирование в электротехнике и электроэнергетике 219
Раздел 8. Применение вычислительной техники в электротехнике и электроэнергетике 234
Раздел 9. Общие вопросы исполнения и надежности электротехнического оборудования 260
Раздел 10. Основные правила оформления конструкторской документации . . 292
Раздел 11. Экономическая эффективность новой техники 340
Раздел 12. Безопасность электроустановок и электрооборудования 356
Раздел 13. Электроизоляционные материалы 380
Раздел 14. Полупроводниковые материалы 401
Раздел 15. Проводниковые материалы 409
Раздел 16. Магнитные материалы . . 439
Раздел 17. Контроль качества электротехнических материалов и изделий . . 464
Предметный указатель 481

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Материал первого тома подготовили:

Раздел 1 — канд. техн. наук, проф. П. Г. Грудинский (§ 1.1, 1.2), инж. А. А. Троицкий (§ 1.3), доктор экон. наук В. Е. Астафьев (§ 1.4)

Раздел 2 — канд. техн. наук, доц. Б. Я. Жуховицкий.

Раздел 3 — канд. техн. наук, проф. А. Н. Старостин (§ 3.1), доктор техн. наук, проф. Е. С. Кухаркин (§ 3.2—3.4, 3.9), канд. техн. наук, доц. В. Д. Соболев и ст. препод. М. Н. Урлапова (§ 3.5—3.7), канд. техн. наук, доц. Н. В. Никулин (§ 3.8)

Раздел 4 — канд. техн. наук, доц. Б. Я. Жуховицкий (§ 4.1—4.5, 4.7, 4.9—4.12), канд. техн. наук, доц. В. Г. Миронов (§ 4.6, 4.8).

Раздел 5 — доктор техн. наук, доц. А. П. Вощинин, канд. техн. наук, доц. В. Б. Кравченко и доктор техн. наук, проф. А. И. Пирогов (§ 5.1—5.5), канд. техн. наук, доц. Е. А. Бородкин

Раздел 6 — доктор техн. наук, проф. Б. Н. Малиновский (§ 6.1—6.5), канд. техн. наук, доц. В. Г. Сергеев (§ 6.6—6.7)

Раздел 7 — доктор техн. наук, проф. В. А. Веников, канд. техн. наук, доц. С. Ю. Сыромятников

Раздел 8 — канд. техн. наук, доц. И. А. Башмаков, канд. техн. наук, доц. С. И. Маслов, доктор техн. наук, доц. В. Г. Миронов (§ 8.1—8.5), канд. техн. наук, доц. В. П. Васин (§ 8.6)

Раздел 9 — канд. техн. наук, доц. Г. С. Плис (§ 9.1—9.5), доктор техн. наук, ст. научн. сотр. Е. Ю. Барзилович, инж. В. В. Лящук и доктор техн. наук, доц. А. А. Липман (§ 9.6, 9.7).

Раздел 10 — канд. техн. наук, доц. К. К. Александров (§ 10.1, 10.2, 10.6, 10.7), ст. преп. Е. Г. Кузьмина (§ 10.3—10.5).

Раздел 11 — канд. экон. наук, доц. В. В. Фураева

Раздел 12 — доктор техн. наук, проф. Б. А. Князевский и инж. С. А. Чекалина.

Раздел 13 — канд. техн. наук, доц. Н. В. Никулин

Раздел 14 — канд. техн. наук, доц. А. Н. Подмарьков

Раздел 15 — канд. техн. наук, доц. А. П. Геппе

Раздел 16 — канд. техн. наук, доц. В. Г. Сергеев . . . . . .

Раздел 17 — доктор техн. наук, проф. В. В. Сухоруков . . . . . .

Материал соответствующих разделов тома просмотрен заведующими кафедрами МЭИ: канд. техн. наук, доц. К. К. Александровым, доктором техн. наук Е. Ю. Барзиловичем, доктором техн. наук, проф. В. А. Вениковым, доктором техн. наук, проф. В. Г. Герасимовым, чл.-кор. АН СССР, проф. К. С. Демирчаном, доктором техн. наук, проф. В. А. Лабунцовым, доктором экон. наук, проф. В. М. Лобановым, доктором техн. наук, проф. В. Н. Малиновским, доктором техн. наук, доц. В. Г. Мироновым, канд. техн. наук, доц. В. С. Филиковым, доктором техн. наук, проф. А. Я. Шихиным.

Редактирование материалов тома осуществлено проф. В. Г. Герасимовым и проф. А. Я. Шихиным.

СОДЕРЖАНИЕ ВТОРОГО ТОМА

Электротехнические изделия и устройства

Раздел 18. Электротехнические кабели, провода и шины
Раздел 19. Электроизоляционные конструкции и изоляторы
Раздел 20. Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы
Раздел 21. Резисторы, конденсаторы, реакторы
Раздел 22. Трансформаторы и автотрансформаторы
Раздел 23. Общие вопросы электрических машин
Раздел 24. Справочные данные серий электрических машин
Раздел 25. Проектирование электрических машин
Раздел 26. Электрические машины автоматических устройств
Раздел 27. Электрические аппараты высокого напряжения
Раздел 28. Трансформаторы тока и напряжения
Раздел 29. Электрические аппараты управления и распредустройств низкого напряжения
Раздел 30. Реле защиты и автоматики
Раздел 31. Электромагниты, системы с постоянными магнитами
Раздел 32. Вентильные преобразователи электрической энергии
Раздел 33. Химические источники тока

СОДЕРЖАНИЕ ТРЕТЬЕГО ТОМА

Книга первая

Производство и распределение электрической энергии

Раздел 34. Электроэнергетические системы
Раздел 35. Переходные процессы в электроэнергетических системах и особые режимы в электроэнергетических системах
Раздел 36. Электрические станции и подстанции (электрическая часть)
Раздел 37. Перенапряжения в электроэнергетических системах и защита от перенапряжений
Раздел 38. Распределительные устройства
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. Технико-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 электротехнологии
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 1

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

СОДЕРЖАНИЕ

1.1. Развитие электроэнергетики и электротехнической промышленности страны за 40 лет советской власти 7
Электроэнергетика (7). Электрификация промышленности (8). Электротехническая промышленность (9). Влияние науки на развитие электрификации (10)
1.2. Развитие электроэнергетики СССР в 1960—1985 гг. 10
Производство электроэнергии (10). Развитие энергосистем. Единая энергосистема СССР (13)
1.3. Развитие электрификации народного хозяйства СССР 14
1.4. Развитие электротехнической промышленности 18
Характеристика электротехнической промышленности (18). Повышение эффективности использования материальных ресурсов в отрасли (19). Основные направления экономии трудовых ресурсов (21). Совершенствование хозяйственного механизма управления отраслью (22)
Список литературы 24

1.1. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРАНЫ ЗА 40 ЛЕТ СОВЕТСКОЙ ВЛАСТИ

Электроэнергетика

Электроэнергетическое хозяйство дореволюционной России по уровню своего развития стояло на одном из последних мест в мире. В 1913 г. установленная мощность электростанций в России составляла (в современных границах) 1,14 млн. кВт, а производство электроэнергии — 2,04 млрд. кВт·ч, или 13,7 кВт·ч на душу населения. Доля России в мировом потреблении энергии равнялась 3,3 %, что соответствовало 17-му месту в мире и было в 12 раз меньше производства электроэнергии в США.

Практически все электростанции работали изолированно — длина электрических линий с напряжением выше генераторного равнялась в 1913 г. 100 км, в 1914 г. начала работать линия электропередачи длиной 70 км, напряжением 70 кВ. Это было наиболее высокое напряжение и самая длинная линия электропередачи в России. Частоты, на которых работали электростанции, были различны — 60, 50, 41, 5, 25, 18 Гц.

Большая часть электростанций имела малую мощность — не выше 500 кВт. При этом преобладали электростанции постоянного тока — их было 68 %, 27 электростанций работали на однофазном (12 %) и трехфазном (15 %) токе.

Турбоагрегаты электростанций в основном были импортными. До 1917 г. отечественными заводами было выпущено всего 27 турбин общей мощностью 9 тыс. кВт.

Бо́льшая часть электростанций была оборудована паровыми двигателями. В 1913 г. число таких электростанций составляло 60 %; 21 % имели двигатели внутреннего сгорания, на 19 % были установлены и те и другие машины.

Русская электротехническая промышленность находилась в полной зависимости от иностранного капитала. Из всего вложенного в электростанции и электрические сети капитала в 265 млн. руб. 51,3 % принадлежало иностранным фирмам, причем вложен он был преимущественно в мощные электростанции — 15—55 тыс. кВт. На русских электротехнических заводах производилось немногим более 50 % электрических машин, аппаратов и материалов, необходимых промышленным предприятиям и населению.

В значительной части заводы эти являлись мастерскими, где электрооборудование собиралось из импортных деталей.

Ко времени окончания гражданской войны и интервенции электростанции практически прекратили работу, оборудование их было до предела изношено, запасные части отсутствовали, топлива не было. В этих тяжелых условиях предстояло не только наладить работу энергетического хозяйства для удовлетворения первоочередных нужд населения и промышленности, но и создать на возможно более высоком техническом уровне базу для развития будущего энерго- и электрохозяйства нашей страны.

Эту задачу решал план ГОЭЛРО — первый в истории человечества единый научный государственный перспективный план развития народного хозяйства, основанный на разработанном В. И. Лениным учении об электрификации как материальной базе коммунизма. Разработка плана и его осуществление в начальный период велись под руководством В. И. Ленина. В. И. Лениным заложены основы для развития электроэнергетики, электрификации и электротехнической промышленности в нашей стране.

Как известно, план ГОЭЛРО, разработанный в 1920 г., был не только выполнен, но и перевыполнен в минимальный установленный срок — 10 лет по всем видам показателей. По установленной мощности районных электрических станций план был выполнен на 146 %. Дальнейшее развитие электроэнергетики СССР в период первых пятилеток и в восстановитель-

Таблица 1 1. **Мощность электростанций и производство электроэнергии в 1913—1950 гг.**

Годы	Все электростанции		В том числе гидроэлектростанции	
	Мощность, млн. кВт	Произведено электроэнергии, млрд. кВт·ч	Мощность, млн. кВт	Произведено энергии, млрд. кВт·ч
1913	1,14	2,04	0,016	0,035
1931	3,97	10,67	0,13	0,59
1935	6,92	26,29	0,90	3,67
1940	11,19	48,31	1,59	5,11
1945	11,12	43,26	1,25	4,84
1950	19,61	91,23	3,22	12,69

ный период после войны показано в табл. 1.1.

Данные табл. 1.1 свидетельствуют о высоких темпах развития электроэнергетики в предвоенные годы и о быстром восстановлении ее после окончания войны. Показателен рост гидроэнергетики, в дореволюционные годы практически не существовавшей.

Большое влияние на снижение удельного расхода топлива имело развитие теплофикации. Доля мощности ТЭЦ в общей мощности электростанций составляла:

Годы	1932	1940	1950
%	11,4	25,2	28,3

Снижение удельного расхода топлива характеризуется следующими данными:

Годы	1913	1928	1940	1950
Грамм на 1 кВт·ч выработанной энергии	1060	820	596	539

Одним из важнейших положений электрификации является концентрация выработки электроэнергии на электростанциях возможно большей мощности с возможно более крупными агрегатами. Выполнение этого положения потребовало широкого развития электросетей и повышения их напряжения. Начиная с 1936 г., при развитии сетей учитывалось создание в будущем Единой энергетической системы СССР. Ход развития электросетей виден из табл. 1.2.

Таблица 1.2. **Протяженность воздушных электросетей напряжением 11 кВ и выше**

Годы	Протяженность, км	В том числе напряжением, кВ		
		220	110—150	35
1932	9 264	—	4 313	4 125
1940	22 482	1107	11 073	8 000
1950	32 757	2498	16 992	11 941

Централизация производства электроэнергии, т. е. отношение энергии, произведенной на районных электростанциях, ко всей энергии, росла: 1932 г. — 67,4 %, 1950 г. — 80,8 %.

Высокими темпами росло потребление электроэнергии на душу населения: в 1913 г.— 13,7, в 1928 г. — 33, в 1940 г. — 252, в 1955 г. — 842 кВт·ч/чел.

Стержневой линией развития энергетики являлись и являются идеи, заложенные в ленинском учении об электрификации и отраженные в плане ГОЭЛРО: перевооружение всех отраслей народного хозяйства на основе использования электроэнергии, опережающий рост темпов развития электроэнергетики, сосредоточение производства энергии на электростанциях возможно большей мощности с наиболее совершенным оборудованием, широкое комплексное использование водных ресурсов страны, сооружение сетей высокого напряжения для объединения электростанций на совместную работу, плановое развитие народного хозяйства и в том числе плановое развитие электроэнергетики.

Соблюдение генеральных направлений в развитии электроэнергетики позволило к 1940 г. резко увеличить ее количественные и качественные показатели. В 1935 г. СССР по производству электрической энергии занял третье место в мире (после США и Германии), а затем вышел на второе место. В 1939 г. были введены первые два агрегата мощностью по 100 000 кВт отечественного производства, на электростанциях устанавливались турбины и котлы, работающие на паре давлением 30—35 ат при температуре перегрева 400—420 °С, было положено начало дальнейшему увеличению параметров теплового оборудования — уже работали отдельные электростанции при давлении 125—140 ат и 500 °С. По мощности теплофикационных установок, по масштабам отпуска тепла и по протяженности тепловых сетей СССР в 1940 г. превосходил все страны Западной Европы, вместе взятые. Мощность ТЭЦ достигла 2 млн. кВт, а протяженность тепловых сетей — 650 км.

К 1950 г. значительно выросла мощность гидроэлектростанций (см. табл. 1.1), их удельный вес в общей мощности поднялся с 1,4 % в 1913 г. до 17 % в 1950 г. В 1932 г. была введена крупнейшая в Европе Днепровская ГЭС с крупнейшими в мире агрегатами по 62 тыс. кВт. В довоенные годы началось освоение водных ресурсов р. Волги.

В 1933 г. началось объединение отдельных энергосистем в объединенные энергосистемы (ОЭС). К 1940 г. на основе развития электрических сетей и использования напряжения 220 кВ (табл. 1.2) были сформированы ОЭС Юга, в 1942 г. — ОЭС Урала, в 1945 г. — ОЭС Центра и к концу 50-х годов были сформированы ОЭС Северо-Запада, Средней Волги, Северного Кавказа, Закавказья, Сибири и Средней Азии. В 1956—1959 гг. началось формирование Единой энергетической системы.

Электрификация промышленности

До Великой Октябрьской социалистической революции Россия значительно отставала от развитых стран по ряду важнейших, в том числе ключевых, показателей промышленности, таких как производительность труда, уровень развития передовых отраслей: металлургии, машиностроения, химии и т. п. План ГОЭЛРО рассматривал электрификацию промышленности как решающую базу для ее быстрого развития и технического перевооружения, а следовательно, и для обеспечения высоких темпов

перевооружения всего народного хозяйства, его экономического роста и решения в процессе построения социализма важнейших социальных проблем.

В плане указывалось, что только электрификация может обеспечить решение коренных задач новой промышленности: механизацию, более совершенное развитие орудий труда, специализацию производства, концентрацию орудий труда и производства, рациональное размещение производительных сил по территории страны. Эти факторы обеспечивают высокую производительность промышленности при минимуме затрат труда.

Для повышения производительности труда необходимо было в первую очередь осуществить электрификацию основных силовых процессов. В табл. 1.3 приведены данные, характеризующие рост потребления промышленностью электроэнергии за период с 1928 по 1955 г., долю общего потребления, распределение потребления между силовыми и технологическими процессами и изменение коэффициента электрификации силовых процессов. В начале первой пятилетки в металлургии и в бумажном производстве еще сохранялся громоздкий и неэкономичный паровой привод и коэффициент электрификации равнялся 0,64. К 1955 г. он достиг 0,89. Соответственно росла и мощность электрического привода (последняя графа табл. 1.3).

Таблица 1.3. Характерные показатели электрификации промышленности за период 1928—1955 гг.

Годы	Потреблено электроэнергии				Коэффициент электрификации	Мощность электрического привода, млн. кВт
	всего в промышленности		в том числе			
	млрд. кВт·ч	% общего потребления	на силовые процессы, %	на технологические, %		
1928	3,3	66,1	83,3	2	0,64	2
1940	32,1	66,4	68,6	18,1	0,84	14,4
1950	60,6	66,4	65,4	23,2	0,87	26,4
1955	113,3	66,6	62	26,4	0,89	46,3

Одновременно с развитием электрического привода шло развитие электротехнологии, электротермических и электролитических процессов. Высокими темпами развивалось производство таких материалов, как электротехнические стали, ферросплавы, алюминий, ряд важных химических продуктов.

Степень электрификации промышленности отражает еще один показатель — электровооруженность труда. Изменение этого показателя за предвоенный период и послевоенные пятилетия характеризуется следующими данными: в 1940 г. электровооруженность труда составляла 2,59 тыс. кВт·ч/чел. (100 %), в 1950 г. — 3,54 тыс. кВт·ч/чел. (148 %), в 1955 г. — 5,18 тыс. кВт·ч/чел. (220 %).

Электрификация производства существенно облегчает его автоматизацию. Автоматизация почти всех видов производств началась с первых лет осуществления плана ГОЭЛРО и непрерывно развивалась. Развитие автоматики значительно повышает производительность труда.

Электротехническая промышленность

Электротехническая промышленность — важнейшая техническая база электрификации. В плане ГОЭЛРО, в котором нашло отражение ленинское учение об электрификации, указывалось, что «деятельность электрических станций становится надежной только в том случае, если рядом существует соответственно развитая электротехническая промышленность» [1]. Предприятия и заводы, существовавшие до революции в России, были слабыми, они могли лишь частично удовлетворить потребности электрификации, широко развернувшейся при осуществлении плана ГОЭЛРО.

После окончания гражданской войны встала задача — восстановить, реконструировать, создать новые производственные предприятия электротехнической промышленности, форсировать работу действующих с тем, чтобы удовлетворить потребности электрификации, в возможно меньшем размере прибегая к импорту, и в самые короткие сроки полностью освободиться от него.

В 1925 г. была проведена специализация электротехнических заводов. В области крупного машиностроения ведущим заводом стал ленинградский завод «Электросила», в области трансформаторостроения — московский «Электрозавод», производство высоковольтной аппаратуры было сосредоточено на ленинградском заводе «Электроаппарат», производство аппаратуры управления, регулирования и реле, а также низковольтной коммутационной аппаратуры — на Харьковском заводе ХЭМЗ, завод «Динамо» стал специализироваться по производству крановой и сварочной аппаратуры, завод «Электрик» был переведен на производство сварочных машин и аппаратов. Возобновили производство кабельные, аккумуляторные, изоляторные, ламповые, электроугольные и другие заводы.

Электротехническая промышленность развивалась высокими темпами, быстро осваивая все более высокие напряжения, мощности и совершенные виды электромашин, трансформаторов, выключателей и т. д. Приведем некоторые примеры.

В области электрогенераторостроения: в 1924 г. был выпущен первый советский турбогенератор мощностью 500 кВт, в 1926 г. — гидрогенератор 8750 кВт (для Волховской ГЭС), в 1927 г. — турбогенератор 6000 кВт, в 1928 г. — турбогенератор 12 000 кВт, в 1930 г. — турбогенератор 25 000 кВт, в 1931 г. — турбогенератор 50 000 кВт, в 1932 г. гидрогенератор 77 500 кВт (для Днепрогэс), в 1937 г. — турбогенератор в 100 000 кВт. Машины всех указанных мощностей выпускались серийно, отличались высокими качествами, надежностью и экономичностью.

В области трансформаторостроения развитие шло такими же быстрыми темпами: в 1924 г. был изготовлен трансформатор

[1] План электрификации РСФСР. М.: Госполитиздат, 1955, с. 40.

750 кВ·А на 35 кВ, в 1931 г. — трансформатор 15 000 кВ·А на 115 кВ, в 1933 г. — трансформаторная группа 60 000 кВ·А на 220 кВ (для Свирской ГЭС).

Высоковольтное аппаратостроение шло в ногу с электромашиностроением и трансформаторостроением: в период 1923—1925 гг. было освоено производство выключателей разного типа и нескольких серий на напряжение 3—35 кВ, с 1928 г. начато серийное производство выключателей 110 кВ, с 1933 г. — выключателей 220 кВ.

Приведенные данные показывают, что начиная с 1930—1933 гг. электротехническая промышленность могла полностью удовлетворять потребности электрификации как по параметрам, так и по количеству электрооборудования. Такое же положение было и в тех отраслях электротехнической промышленности, которые призваны удовлетворять потребности промышленных, транспортных и сельскохозяйственных предприятий народного хозяйства СССР.

Влияние науки на развитие электрификации

План ГОЭЛРО был научно обоснованным планом, составленным с учетом закономерностей развития народного хозяйства, развития общественного строя, прогноза будущего — ближайшего на 10 лет и далекого — на 25 лет. План был составлен при самом активном участии крупнейших ученых в области электротехники.

За выполнением плана следили не только практики, но и люди науки, входящие в Центральный электротехнический совет (ЦЭС). ЦЭС рассматривал и утверждал все проекты, планы, основные руководящие указания электроэнергетики и электротехнической промышленности. ЦЭС был организован в 1919 г. и принимал активное участие в разработке плана ГОЭЛРО. В 1921 г. сразу же после утверждения плана ГОЭЛРО был создан еще один научно-технический центр — Государственный экспериментальный электротехнический институт (ГЭЭИ), преобразованный позднее во Всесоюзный электротехнический институт (ВЭИ им. В. И. Ленина). В первые годы своей деятельности ВЭИ удовлетворял запросы электротехнической промышленности и электроэнергетического строительства в теоретических и экспериментальных исследованиях, а затем полностью перешел к темам электротехнической промышленности.

Огромную помощь оказал ВЭИ в решении таких острых проблем, как защита от перенапряжений, повышение устойчивой работы энергосистем и их автоматизация, исследование и наладка режимов электрических машин, автоматизация ряда производственных процессов. На основе его научных исследований, охвативших многие электрофизические процессы, и пионерских разработок конструкций электротехническая промышленность создала практически все виды электрооборудования.

Широкий охват научной тематики ВЭИ позволил на его базе создать в послевоенное время ряд институтов в области электромеханики, электропривода, электроники, радиотехники, светотехники, автоматики, кабельной техники и др. ВЭИ содействовал организации при всех ведущих заводах специализированных научно-исследовательских институтов, с которыми ВЭИ тесно сотрудничает.

Основными научно-исследовательскими институтами, разрабатывающими проблемы электроэнергетики, являются Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского (ЭНИН) и Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики (ВНИИЭ). Первый из них (основан в 1931 г.) занимается вопросами закономерностей развития сложного комплекса энергетического хозяйства, его планирования, управления режимами работы, определения оптимальных параметров основного оборудования, выбора видов транспорта энергии, определения экономически эффективного топливного баланса, воздействие энергетики на технологические процессы в различных отраслях производства и т. п. Второй (основанный в 1944 г.) изучает работу электрооборудования в условиях эксплуатации, исследует режимы работы, рекомендует наиболее эффективные методы ведения эксплуатации, оценивает свойства головных образцов электрооборудования, определяет направления в разработке новых типов электроаппаратов.

Развитие электроэнергетики, электрификации и электротехнической промышленности потребовало подготовки большого количества высококвалифицированных специалистов. До Великой Октябрьской социалистической революции инженеров электротехнической специальности выпускали Петербургский электротехнический институт (ныне ЛЭТИ им. В. И. Ульянова-Ленина) и Московское техническое училище (ныне МВТУ им. Н. Э. Баумана).

Новый этап в развитии электротехнических специальностей начался после Великой Октябрьской социалистической революции. Если за весь дореволюционный период Московским техническим училищем было выпущено всего 74 инженера-электрика, то за период 1917—1930 гг. выпуск таких инженеров составил 3000 чел.

В 1930 г. на базе электротехнических факультетов МВТУ и Института народного хозяйства им. Г. В. Плеханова был создан Московский энергетический институт, который стал центром подготовки высококвалифицированных инженеров-энергетиков и инженеров многих электротехнических специальностей. К 1960 г. МЭИ подготовил для народного хозяйства около 25 тыс. инженеров.

1.2. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ СССР в 1960—1985 гг.

Производство электроэнергии

Основные положения развития энергетики СССР при переходе к развитому социалистическому строю сохранялись такими же, как за первые сорок лет после плана ГОЭЛРО: преимущественное развитие по сравнению с другими отраслями народного хозяйства; максимальная концентрация производства; наибольшее экономически оправданное снижение расхода топлива; комплексное использование

гидроресурсов. В последние годы важное значение получило развитие атомной энергетики.

Рост производства электроэнергии в СССР виден из табл. 1.4.

Таблица 1.4. **Рост производства электроэнергии в СССР, млрд. кВт·ч**

Годы	Всего	В том числе		
		тепловые (ТЭС)	гидро (ГЭС)	атомные (АЭС)
1960	292,3	241,4 (82,6 %)	50,9 (17,4 %)	—
1970	740,9	612,8 (82,7 %)	124,4 (16,8 %)	3,7 (0,5 %)
1980	1239,9	1037,1 (80,2 %)	183,9 (14,2 %)	72,9 (5,6 %)
1985 (план)	1540	1167	230	220

Электрические станции. В табл. 1.5 показан рост мощности электростанций и структура мощности по видам источников энергии.

Таблица 1.5. **Установленная мощность электростанций СССР, млн. кВт**

Годы	Всего	В том числе		
		тепловые (ТЭС)	гидро (ГЭС)	атомные (АЭС)
1960	66,7	51,9 (77,8 %)	14,8 (22,2 %)	—
1970	166,2	133,8 (80,5 %)	31,4 (18,9 %)	9,5 (0,6 %)
1980	266,7	201,9 (75,7 %)	52,3 (19,6 %)	12,5 (4,7 %)
1985 (план)	317,0	227,4 (71,7 %)	61,5 (19,4 %)	28,1 (8,9 %)

Рост энергетических мощностей происходит в основном путем ввода в действие мощных агрегатов (энергоблоков) 200, 300, 500, 800 МВт на крупных тепловых электростанциях, до 640 МВт на гидростанциях и реакторных блоков 440 и 1000 МВт на атомных электростанциях. Рост единичной мощности электрогенерирующего оборудования позволяет из года в год увеличивать концентрацию производства электроэнергии и ее централизацию.

Число электростанций, единичная мощность которых превышает 1 млн. кВт, достигло к началу 1981 г. 72, общая их установленная мощность 145 млн. кВт, или более 54 % мощности всех электростанций страны, из них 33 электростанции имели мощность 2 млн. кВт каждая, 10 — по 3 млн. кВт и более. Среди тепловых электростанций самая крупная — Рефтинская ГРЭС — 3,8 млн. кВт. Среди гидростанций — Красноярская ГЭС — 6 млн. кВт. Среди атомных электростанций — Ленинградская АЭС — 4 млн. кВт.

Цетрализация производства электроэнергии в СССР характеризуется непрерывным ростом коэффициента централизации:

1960	1970	1980	1985 (план)
88,1	96,0	98,3	98,5

Особое место в советской теплоэнергетике занимает теплофикация — комбинированное производство электрической и тепловой энергии. По масштабам электроснабжения от теплоэлектроцентралей СССР занимает первое место в мире. Теплофикация позволяет экономить до 25 % топлива по сравнению с раздельной выработкой электрической и тепловой энергии.

В последние годы освоено серийное производство крупных теплофикационных турбоагрегатов единичной мощностью 100, 135 и 250 МВт. Теплофикационные блоки по 250 МВт работают на ряде крупных ТЭЦ в Москве и Киеве. Установленные мощности шести ТЭЦ превышают 1000 МВт каждая, наиболее крупная из них имеет мощность 1250 МВт.

Наиболее значимой слагающей себестоимости электроэнергии тепловых электростанций является себестоимость топлива, составляющая более 70 % себестоимости. Поэтому важнейшей задачей снижения стоимости энергии представляется снижение удельных расходов топлива. Укрупнение энергетического оборудования, повышение его КПД, развитие теплофикации, улучшение структуры топливного баланса электростанций способствует постоянному улучшению важнейшего показателя в теплоэнергетике — удельного расхода топлива, как это можно видеть из табл. 1.6.

Таблица 1.6. **Снижение среднего удельного расхода топлива (условного)**

Годы	На отпущенный 1 кВт·ч электроэнергии, г/(кВт·ч)	На отпущенную 1 Гкал тепловой энергии, кг/Гкал
1960	471	181,2
1970	366	175,6
1980	328	173,0
1985 (план)	319	172,0

На тепловых электростанциях обращается большое внимание на охрану окружающей среды: устанавливаются высокоэффективные золоуловители (КПД до 99 %), высота труб достигает 320 м, внедряются системы с замкнутым циклом технологических вод, уменьшаются площади золо- и шлакоотвалов, рекультивируются земельные участки после их использования.

Большое значение для развития энергетики СССР имело использование атомной энергии, начавшееся в 1954 г. сооружением Обнинской АЭС (Калужская область). Это была первая в мире атомная электростанция.

Доля атомной энергии в общем балансе страны в настоящее время относительно невелика — около 15 %, но в перспективе намечается значительное ее повышение. По приросту мощности атомные электростанции занимают ведущее положение.

На советских АЭС большое развитие получили водо-водяные атомные реакторы (ВВЭР) мощностью до 1000 МВт, урано-графитовые реакторы такой же мощности (РБМК-1000) и более мощные реакторы этого типа (РМБК-1500). Мощные реакторы будут установлены на ряде расширяемых и строящихся АЭС, например на Курской (7×1000), Чернобыльской (6×1000), Игналинской (4×1500), Запорожской (6×1000), Башкирской (6×1000), Смоленской (4×1000), Калининской (4×1000) и ряде других АЭС.

В настоящее время реакторы работают на тепловых нейтронах, используя уран-235 (его содержание в природном уране составляет 0,7 %). Новым этапом развития является применение реакторов на быстрых нейтронах, позволяющих использовать уран-238, более распространенный в природе. Реактор на быстрых нейтронах не только вырабатывает электроэнергию, но одновременно и новое атомное горючее—плутоний. Первый промышленный реактор на быстрых нейтронах уже работает на Шевченковской АЭС (150 МВт). На Белоярской АЭС в 1980 г. введен в эксплуатацию энергоблок на быстрых нейтронах мощностью в 600 МВт.

Атомные электротеплоцентрали (АТЭЦ) найдут применение в крупных городах. Уже сооружаются АТЭЦ в Одессе и атомные станции теплоснабжения (АСТ) в Горьком и Воронеже.

За все время развития энергетики СССР большое внимание уделялось сооружениям гидростанций, эффективность которых очень велика. Работая на возобновляемых источниках энергии, они одновременно решают задачи водного транспорта и мелиорации. Гидростанции вместе с гидроаккумулирующими электростанциями имеют большое значение для экономичного и надежного выравнивания графика нагрузки, для покрытия ее пиков.

Доля ГЭС в выработке энергии в целом по СССР составляет 14 %. Однако в ряде экономических районов (Поволжский, Закавказский, Средне-Азиатский, Восточно-Сибирский) она больше и доходит до 25—50 %. Единичная мощность ГЭС значительна — ГЭС с мощностью 100 МВт и выше составляют 92,5 % всей установленной мощности ГЭС страны, мощность 14 гидростанций по 1000 МВт и более равна 64 % всей гидроэнергетической мощности.

Гидростанции оборудованы гидроагрегатами очень большой единичной мощности, наиболее мощными являются гидроагрегаты Красноярской (500 МВт) и Саяно-Шушенской (640 МВт) ГЭС. Созданы гидроагрегаты для гидростанций с высокими напорами — 200—400 м. В настоящее время строительство ГЭС продолжается, в разных районах сооружается около 30 гидростанций. Наиболее рентабельные из них находятся в Сибири, на Дальнем Востоке, в Средней Азии.

Наряду со строительством «пиковых» ГЭС в центральном, южном и северо-западном районах европейской части СССР развивается строительство гидроаккумулирующих электростанций. На р. Днепре уже работает первая в СССР Киевская ГАЭС мощностью 225 МВт, вблизи Москвы сооружается Загорская ГАЭС мощностью 1200 МВт, в Литве — Каяшадорская ГАЭС мощностью 1600 МВт, в перспективе до 1900 г. предусмотрено начало строительства еще нескольких мощных ГАЭС.

Для нашей страны характерно строительство ГЭС каскадами, что дает наиболее эффективное использование водноэнергетических ресурсов. Уже созданы такие крупные каскады, как Волжский, Камский, Днепровский и др., в процессе создания находятся такие грандиозные каскады, как Енисейский, Ангарский, Вахшский, Нарынский и др.

В перспективе намечено широкое использование энергии малых рек, ведутся изыскательские работы по приливным гидроэлектростанциям.

Линии электропередачи и электрические сети. Распределение электроэнергии по такой огромной стране, как СССР, и осуществление связи между электростанциями для их совместной работы требуют сооружения линий электропередач и развитых электросетей очень высоких напряжений и большой протяженности. Рост напряжений и протяженности электросетей отражен в табл. 1.7.

Таблица 1.7. **Рост напряжений и протяженности линий электропередачи**

Напряжение, кВ	Протяженность воздушных линий, тыс. км				
	1965 г.	1970 г.	1975 г.	1980 г.	1985 г. (план)
Постоянный ток:					
800	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Переменный ток:					
35—110—154	255,5	367,3	493,5	622,4	726,3
220	35,2	50,2	70,3	92,8	115,4
330	7,3	14,2	19,4	24,3	28,2
500*	8,3	13,2	19,4	25,5	36,2
750	—	0,1	1,7	2,8	5,4
1150	—	—	—	—	1,5
Всего 35 кВ и выше	306,8	445,5	604,8	768,3	913,3

* Включая линии 400 кВ для связи с энергосистемами стран—членов СЭВ.

Напряжение 500 кВ было использовано для передачи энергии двух первых мощных волжских гидростанций Куйбышев—Москва и Волгоград — Москва. Первая из этих электропередач вначале работала на напряжении 400 кВ, а с 1961 г. обе электропередачи работают на напряжении 500 кВ с пропускной способностью 800—1000 МВт.

В 1967 г. была сооружена опытная электропередача напряжением 750 кВ Конаковская ГРЭС — Москва, а в 1975 г. введена в действие линия электропередачи 750 кВ Донбасс — Днепр—Винница—Западно-Украинская подстанция. Напряжение 750 кВ принято как основное для Северо-Запада, Запада и Юга СССР. Сети 500 кВ охватили среднюю часть европейской части СССР, Урал, Сибирь, Среднюю Азию и Кавказ. Начато сооружение мощных магистралей в Сибири на переменном напряжении 1150 кВ. В перспективе намечается использование электропередачи постоянного тока 1500 кВ и выше для связи Сибири и европейской части СССР.

Соответственно растет пропускная способность и протяженность распределительных сетей. Следует отметить большое развитие, которое получили сети сельской электрификации. Они продолжают расти быстрыми темпами: если в 1960 г. их протяженность была равна 0,73 млн. км, то в 1980 г. она достигла 3,8 млн. км.

Развитие энергосистем. Единая энергосистема СССР

Объединение электростанций в энергосистемы повышает надежность электроснабжения, обеспечивая их взаимное резервирование. При этом создаются условия для улучшения режима электростанций, лучше используются наиболее экономичные электростанции, создается возможность для благоприятных режимов гидростанций. Чем мощнее энергосистема, тем большей единичной мощностью могут оснащаться электростанции. Чем протяженнее сети энергосистемы, тем больше системный эффект — экономия мощности из-за неодновременности наступления по времени максимумов нагрузок в удаленных точках энергосистемы и уменьшения потребности в резервной мощности. Поэтому естественным представляется стремление к созданию Единой энергосистемы СССР.

Первые энергосистемы были организованы в период реализации плана ГОЭЛРО. С 1933 г. началось постепенное их объединение и в 1945 г. была создана Объединенная энергосистема Центра со своим диспетчерским управлением. К концу 50-х годов были организованы Объединенные энергосистемы Северо-Запада, Средней Волги, Урала, Северного Кавказа, Юга, Сибири и др. и в 1957 г. было создано Объединенное диспетчерское управление Единой энергетической системой европейской части СССР. В 1972 г. в основном было закончено формирование Единой энергетической системы СССР (ЕЭС).

В настоящее время в СССР действуют 11 ОЭС: Центра, Средней Волги, Урала, Северо-Запада, Юга, Северного Кавказа, Закавказья, Казахстана, Сибири, Средней Азии, Востока, 9 из них (кроме Средней Азии и Востока) входят в состав ЕЭС.

Основные данные ЕЭС СССР приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.8. **Основные данные ЕЭС СССР на 1/I 1980 г.**

Количество ОЭС, входящих в ЕЭС СССР	9
Установленная мощность электростанций, млн. кВт	211,5
В том числе:	
конденсационных, млн. кВт	97,7
теплофикационных, млн. кВт	62,6
гидравлических, млн. кВт	41,2
атомных	10,0
Производство электроэнергии, млрд. кВт	1096,3
Максимум нагрузки, млн. кВт	171
Протяженность электрических сетей 220 кВ и выше, тыс. км	116
В том числе 500 и 750 кВ, тыс. км	25

Оперативное управление энергетическими системами осуществляется по иерархическому принципу. Оно имеет четыре ступени: Центральное диспетчерское управление ЕЭС СССР (ЦДУ), расположенное в Москве; 11 территориальных объединенных диспетчерских управлений (ОДУ); 95 центральных диспетчерских пунктов при районных энергетических управлениях (ЦДП); около 3000 диспетчерских пунктов сетевых предприятий и более 900 пунктов управления электростанциями.

Высший орган диспетчерского управления — ЦДУ ЕЭС СССР — осуществляет оперативное управление Единой энергетической системой в целом. Для управления используются управляющие вычислительные центры (УВЦ) в ЦДУ, во всех ОДУ и в большинстве ЦДП. УВЦ оснащены электронными вычислительными машинами (ЭВМ), с помощью которых решаются все основные задачи управления в нормальных и аварийных режимах, выполняются долгосрочные и суточные прогнозы нагрузки, производится ее оптимальное распределение между ОЭС и электростанциями, выбираются параметры настройки релейной защиты и противоаварийной автоматики, определяются наиболее рациональные режимы сработки водохранилищ гидростанций и т. п.

Обмен оперативной информацией ведется по системе, обеспечивающей быструю и точную передачи информации. Текущая информация обрабатывается, систематизируется и накапливается, периодически обновляется и по мере необходимости выдается диспетчерам.

Надежность работы ЕЭС СССР, ОЭС и энергосистем обеспечивается за счет систем автоматического регулирования частоты и мощности, применения наиболее совершенных средств релейной защиты и широкого внедрения противоаварийной автоматики. Ведутся работы по созданию иерархической централизованной системы регулирования частоты и мощности на базе использования ЭВМ на разных ступенях диспетчерского управления.

ЕЭС СССР имеет тесные связи с Международной энергетической системой социалистических стран, являясь одним из ее основных членов. В 1978 г. реализован важный этап развития внешних связей ЕЭС СССР — введена междугосударственная электропередача 750 кВ СССР — ВНР, что значительно повысило пропускную способность и надежность связей. С учетом ранее осуществленного присоединения к ЕЭС сетей Монгольской Народной Республики создано гигантское международное энергообъединение социалистических стран, охватывающее территорию от Улан-Батора до Берлина.

В Энергетической программе СССР на длительную перспективу [1.5] предусматриваются снижение в топливном балансе электростанций мазута и в последующем природного газа за счет атомных электростанций и станций, использующих дешевые угли, добываемые открытым способом, а также крупных гидроэлектростанций в восточных районах страны, завершение формирования Единой электроэнергетической системы страны с повышением ее маневренности и надежности, дальнейшее развитие комбинированного производства электрической и тепловой энергии.

При реализации программы должно быть демонтировано и модернизировано большое количество устаревшего и малоэффективного оборудования. Получат дальнейшее развитие межсистемные связи за счет строительства линий электропередачи переменного тока напряжением 1150 и 750 кВ, а также постоянного тока 1500 кВ. Расширяются распределительные сети напряжением 35 кВ и выше.

Реализация Энергетической программы СССР обеспечивает ускоренные темпы электрификации народного хозяйства. Удельная электроемкость народного хозяйства должна по-

выситься на 5—6 % в первом десятилетии и до 15 % — за 20 лет. Одновременно предусматривается дальнейший рост энергопотребления на душу населения. За счет проведения активной энергосберегающей политики будет ускорен процесс снижения удельной энергоемкости национального дохода. За двадцатилетие этот показатель уменьшится на 12—17 %.

1.3. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР

Электрификация народного хозяйства является одним из важнейших путей эффективного развития его производительных сил и улучшения условий труда и быта людей. Она в наибольшей мере способствует совершенствованию технологий, росту объема продукции и повышению производительности труда.

Электрическая энергия является наиболее прогрессивной формой по сравнению с другими формами энергий, что определяет опережающее ее использование в народном хозяйстве СССР. Соотношение между использованием различных форм энергии и их динамика показаны в табл. 1.9.

Таблица 1.9. **Изменение структуры потребления энергии за 1950—1980 гг., % всей потребляемой энергии**

Форма энергии	Годы			Рост с 1950 по 1980 г., раз
	1950	1965	1980	
Электрическая	3,2	11,1	14,5	4,53
Пар и горячая вода	20	36,7	42,0	2,10
Прямое использование топлива	76,8	52,2	43,5	0,57

За тридцать лет с 1950 по 1980 г. абсолютное потребление энергии возросло в 6 раз, следовательно, относительное потребление электрической энергии увеличилось в $4{,}53 \cdot 6 = 27{,}18$ раза, в то время как энергия пара и горячей воды — в 12 раз, а прямого потребления топлива — в 3,3 раза.

Соотношение между потреблением электроэнергии и суммарным потреблением топливно-энергетических ресурсов называют коэффициентом электрификации и измеряют в кВт·ч на тонну условного топлива. С 1960 по 1980 г. коэффициент электрификации увеличился с 430 до 760 кВт·ч/т, т. е. в 1,76 раза. Этот коэффициент хорошо отражает динамику замены электрической энергией других форм энергии.

Для характеристики уровня и глубины электрификации народного хозяйства в целом и отдельных его отраслей используется несколько показателей: *электроемкость народного дохода* — отношение затрат электроэнергии в кВт·ч к национальному доходу в рублях; *электроемкость продукции* — затраты энергии в кВт·ч на рубль стоимости валовой продукции или на ее тонну; *электровооруженность труда* — затраты электрической энергии на одного рабочего. Обобщающим показателем является *производство энергии на душу населения* в кВт·ч на человека.

В табл. 1.10 приведены значения показателей, характеризующих уровни и динамику электрификации народного хозяйства СССР за 1965—1980 гг. Потребление энергии указано без потерь в сетях общего пользования, стоимость — по ценам 1975 г., численность рабочих и жителей — среднегодовая.

Важным показателем является электровооруженность труда. Из данных табл. 1.11 видно, что за последние 25 лет она в стране неуклонно возрастает и в каждой отрасли хозяйства имеет свою специфику. Однако в каждой отрасли производительность труда растет быстрее, чем электровооруженность, хотя последняя имеет прямое влияние на производительность труда. Для примера в табл. 1.12 дано сопоставление между электровооруженностью труда и его производительностью за 25 лет.

Расширение использования электроэнергии в СССР и углубление процессов электрификации происходит во всех отраслях народного хозяйства СССР, как это видно из табл. 1.13.

В нашей стране основным потребителем электроэнергии является промышленность, в особенности такие ее отрасли, как химическая, цветная и черная металлургия, машиностроение. В то же время ее доля в общем электропотреблении снижается в связи с опережающим электропотреблением в сельском хозяйстве, на транспорте и в коммунально-бытовой сфере.

Все возрастающее потребление электрической энергии и все возрастающие затраты на добычу и транспорт топлива, необходимого для ее выработки, остро поставили вопрос об экономии топлива и энергии, о внедрении энергосберегающих технологий. Стратегическая направленность экономической политики в отношении экономии энергии сочетается с политикой углубления электрификации всех отраслей народного хозяйства.

В результате проводимых мероприятий по экономии электроэнергии и изменения структуры ее потребления электроемкость промышленного производства снижается, как это показывает табл. 1.14.

Электроэнергетика, преобразующая низкокачественные топливные ресурсы в квалифицированный вид энергии и вовлекающая в энергетический баланс атомную и гидравлическую энергии, способствует вытеснению нефти и газа из сферы котельно-печного потребления в химическое производство и для получения моторных топлив и светлых нефтяных продуктов. Кроме того, электрическая энергия может заменить прямое потребление дефицитных видов топлива в ряде промышленных технологий. Особенно эффективно использование электрической энергии в тех технологических процессах, где она выступает в качестве непосредственного инструмента технологии (табл. 1.15).

Наиболее электроемкими являются в силу специфики их технологий такие отрасли промышленности, как металлургия, химическая, нефтехимическая и нефтеперерабатывающая, топливная, машиностроительная (табл. 1.16).

Структура и объем потребления электрической энергии внутри каждой отрасли промышленности зависят от ее специфики, определяющей пути эффективного использования электро-

Таблица 1.10. Характеристика уровня и динамики электрификации народного хозяйства СССР за 1965—1980 гг.

Показатель	1965 г.	1970 г.	1975 г.	1980 г.
Произведено энергии на душу населения, кВт·ч на человека	2200	3020	4040	4800
Электроемкость промышленности:				
кВт·ч на рубль национального дохода	1,84	1,78	1,8	1,73
кВт·ч на рубль промышленной продукции	1,41	1,37	1,28	1,22
Электроемкость сельского хозяйства:				
кВт·ч на рубль национального дохода	0,06	0,09	0,15	0,18
кВт·ч на рубль продукции отрасли	0,14	0,24	0,48	0,60
Электроемкость транспорта:				
кВт·ч на рубль национального дохода	0,19	0,20	0,21	0,23
кВт·ч на 1000 т грузооборота	13,4	14,2	14,3	15,7
Электроемкость быта и сферы обслуживания:				
кВт·ч на рубль национального дохода	0,31	0,34	0,38	0,41
кВт·ч на жителя	257	388	546	686

Таблица 1.11. Рост электровооруженности труда с 1965 по 1980 г.

Показатель	1965 г.	1970 г.	1975 г.	1980 г.	Рост за 25 лет, раз
В промышленности, тыс. кВт·ч:					
на 1 занятого	12,7	15,5	19,2	21,0	1,65
на 1 рабочего	15,4	19,5	25,0	27,6	1,79
В сельском хозяйстве, тыс. кВт·ч на 1 занятого	0,48	1,07	2,29	3,7	7,7
На транспорте, тыс. кВт·ч на 1 занятого	5,12	6,8	8,05	10,0	1,95
В сфере обслуживания, тыс. кВт·ч на 1 занятого	1,22	1,78	2,28	2,26	2,18

Таблица 1.12. Сопоставление электровооруженности и производительности труда, % к 1965 г.

Показатель	1965 г.	1970 г.	1975 г.	1980 г.	1985 г. (план)
Электровооруженность труда	100	127	162	179	206
Производительность труда	100	132	177	207	245

Таблица 1.13. Структура и объем потребления электроэнергии народным хозяйством СССР

Показатель	1975 г.	1980 г.	1982 г.	1985 г. (план)
Промышленность:				
млрд. кВт·ч	587,6	689,0	717,7	801
% полезного отпуска	67,1	63,5	62,9	62,3
Строительство:				
млрд. кВт·ч	21,3	26,2	25,6	27,5
% полезного отпуска	2,4	2,4	2,2	8,1
Транспорт:				
млрд. кВт·ч	74,2	102,7	112,5	126,5
% полезного отпуска	8,5	9,5	9,8	9,8
Сельское хозяйство:				
млрд. кВт·ч	73,8	111,0	120,5	142
% полезного отпуска	8,4	10,3	10,6	11,0
Коммунально-бытовые нужды городов:				
млрд. кВт·ч	119,1	155,0	165,9	190,2
% полезного отпуска	13,6	14,3	14,5	14,8
Полезный отпуск потребителям:				
млрд. кВт·ч	876,0	1082,9	1141,7	1287,2
%	100	100	100	100

Таблица 1.14. Сопоставление роста промышленной продукции и потребления электроэнергии

Показатель	1975—1980 гг.	1980 г.—1985 гг. (план)
Производство промышленной продукции, %	124	120
Потребление электроэнергии в промышленности, %	117,1	116,4

Таблица 1.15. Структура использования электрической энергии в народном хозяйстве

Показатель	1965 г.	1970 г.	1975 г.	1980 г.
Потребление в народном хозяйстве (100 %):				
силовые процессы	59	60	59	58
технологические процессы	19	21	22	23
хозяйственные процессы	22	19	19	19

Таблица 1.16. Потребление электроэнергии по отраслям промышленности

Отрасли промышленности	Потребление электроэнергии, млрд. кВт·ч			Доля в общем потреблении, %		
	1975 г.	1980 г.	1985 г. (план)	1975 г.	1980 г.	1985 г. (план)
Промышленность—всего	587,6	688	801	100	100	100
В том числе:						
черная металлургия	94,6	115,2	133	16,1	16,7	16,6
цветная металлургия	92,4	106,6	117	15,7	15,5	14,6
химическая и нефтехимическая	91,6	101,6	117,8	15,6	14,8	14,7
топливная	60,8	76,9	29,3	10,3	11,2	12,4
машиностроение	90,3	107,9	124,9	15,4	15,7	15,6
остальные отрасли	157,9	179,8	209	26,9	26,1	26,1

энергии и внедрения прогрессивных технологий; так, стоимость 1 т никеля, получаемой в электропечах, почти на 30 % ниже, чем в шахтных. Стоимость электроплавки 1 т первичных алюминиевых сплавов на 20 %, а вторичных — на 45 % ниже, чем в отражательных печах. Электротермообработка металла снижает в 2—3 раза потери на угар по сравнению с пламенными печами и т. д.

Указанные преимущества использования электроэнергии, а также облегчение при ее применении автоматизации многих процессов и их механизации предопределяют дальнейший рост электрификации и, следовательно, увеличение потребления электроэнергии.

Для каждой из отраслей промышленности характерна своя электроемкость производства, определяемая спецификой ее технологий и ее структурой. При этом при изменении технологических процессов электроемкость производства (кВт·ч/руб.) в отраслях существенно изменяется (табл. 1.17).

Таблица 1.17. **Динамика электроемкости отдельных отраслей промышленности СССР, кВт·ч/руб.**

Отрасли промышленности	1950 г.	1965 г.	1980 г
Электроемкость в промышленности в целом	1,25	1,47	1,22
В том числе:			
машиностроение	2,4	1,17	0,59
химическая промышленность	4,60	3,50	2,29
топливная промышленность	1,30	1,73	2,16
легкая промышленность	0,22	0,26	0,23
пищевая промышленность	0,1	0,23	0,18

Уровни и особенности электрификации отдельных отраслей промышленности характеризуются следующими данными.

В черной металлургии в десятой пятилетке электротехнологические процессы развивались с опережением. Выплавка электростали повысилась с 9,9 до 10,7 % общего производства стали, возросла доля электроприводных агрегатов производства кислорода, увеличилась выплавка легированных сталей и ферросплавов, производство которых связано с повышенной электроемкостью. В результате при росте выпуска промышленной продукции отрасли на 11 % потребление электроэнергии возросло в ней на 22 %.

Эти же направления сохраняются и на последующую перспективу, что приведет к повышению электроемкости с 778 кВт·ч/т в 1980 г. до 817 кВт·ч/т в 1985 г.

Долю выплавки электростали в 1985 г. намечено увеличить до 13 %, что потребует роста электроемкости до 109 кВт·ч/т вместо 90,9 в 1980 г. На установках непрерывной разливки стали намечено получить около 15 % всей ее выплавки вместо 11,8 % в 1980 г. Это связано с увеличением электроемкости на 25—28 кВт·ч на тонну листов заготовки, но позволяет на 12 % сократить расход металла, уменьшить затраты топлива для нагрева слитков в среднем на 40 кг/т и сэкономить 18—20 кВт·ч/т на прокате слитков обжимными станами.

Среди новых прогрессивных технологий, направленных на повышение качества металла, но требующих значительного увеличения расхода электроэнергии (в 2—3 раза), следует отметить расширение использования обработки стали синтетическими шлаками, инертными газами, применения вакуумирования, электрошлакового и вакуумно-дугового переплавов, микролегирования. Потребует увеличения расходов электроэнергии дальнейшее расширение сортамента и повышение качества проката, расширение производства тонколистового проката, в том числе с покрытием алюминием, никелем и другими материалами, хромированной жести.

На строящемся Оскольском металлургическом комбинате впервые в СССР внедряется бездоменное получение железа из руды на основе новой электротехнологии.

Будет увеличиваться доля железорудного концентрата и окатышей в общем объеме производства товарной железной руды, что позволит повысить производство железорудного концентрата с содержанием железа до 63—65 %, но потребует увеличения расхода электроэнергии на 12—15 %. Однако это увеличение очень эффективно, поскольку повышение содержания железа в руде на 1 % увеличивает производительность доменных печей на 2 % и снижает расход топлива при производстве чугуна на 1,0 кг у. т.

Одновременно во всех производствах черной металлургии намечено введение прогрессивных мероприятий, направленных на экономию электрической энергии путем интенсификации, совершенствования и автоматизации технологических процессов. В горнорудной промышленности предусмотрено увеличение разработок руды открытым способом с использованием высокопроизводительных роторных комплексов; в доменном производстве будут обеспечены повышение средней температуры дутья и давления газа под колошником, интенсификация производства чугуна с применением кислорода и природного газа, увеличение объема и производительности доменных печей; в сталеплавильном производстве расширяется применение кислорода и автоматического управления в процессах выплавки стали; в прокатном производстве намечено осуществить улучшение технологии нагрева заготовок, сокращение количества их пропусков, модернизацию основного и вспомогательного оборудования прокатных станов.

Специфика и эволюция технологии черной металлургии, несмотря на меры, направленные на экономию электроэнергии, потребуют, как указано выше, дальнейшего опережающего темпа роста электроемкости отрасли по сравнению с темпами роста промышленного производства.

В цветной металлургии основную долю потребления электроэнергии (около 70 %) занимают электролизные процессы получения таких металлов, как алюминий, никель, магний. Доля этих, а также электротермических процессов в общем электропотреблении отрасли будет возрастать и далее. К числу факторов, влияющих на увеличение потребления электроэнергии, относятся дальнейшее повышение качества и чистоты металлов и объемов их производства, осуществление комплексной

механизации трудоемких процессов добычи руд и т. п. Однако за счет комплекса технологических мероприятий по экономии и эффективному использованию электроэнергии в цветной металлургии предусматривается снижение электроемкости. Так, намечено сократить электроемкость производства алюминия с 17 590 кВт·ч/т в 1980 г. до 17 270 кВт·ч/т в 1985 г. за счет совершенствования анодной системы электролизеров и применения новых, более совершенных электролизеров.

В химической промышленности за счет внедрения новых энергосберегающих технологий в 1975—1980 гг. потребление энергии отрасли возросло всего в 1,18 раза при росте производства в 1,35 раза. Внедрение энергосберегающих технологий будет осуществляться и в дальнейшем. Так, сооружение принципиально новых укрупненных установок позволит снизить энергоемкость производства аммиака с 1,6 по традиционной схеме до 0,5 тыс. кВт××ч/т, что даст возможность снизить суммарную энергоемкость почти на 20 %. В метанольном производстве повышение единичной мощности агрегатов и применение бесконверсионных схем позволит уже в 1985 г. сократить расход энергии более чем на одну треть по сравнению с 1980 г.

В производстве хлора, каустической соды предусмотрено введение мощных диафрагменных электролизеров и переход к металлическим анодам, что сэкономит до 20 % электроэнергии. В производстве карбамида усовершенствование технологических схем позволит сократить энергоемкость в 1985 г. на 10 % (до 450 кВт·ч/т), а использование новых схем обещает дальнейшее сокращение еще на 20 %. В производстве полиэтилена применение нового газофазного метода полимеризации даст существенное сокращение электроемкости.

В отраслях топливной промышленности идут противоположные процессы: в угледобыче за счет применения открытого метода добычи электроемкость в 1980—1985 гг. должна снизиться на 4—7 %, в нефтепереработке из-за увеличения доли добычи механизированным способом, роста закачки воды, большей обводненности нефти электроемкость возрастет на 10 %, в нефтеперерабатывающей промышленности из-за существенного углубления нефтепереработки, роста доли вторичных процессов электроемкость в текущей пятилетке возрастет на 12—15 %.

В машиностроении и в металлообработке в 1975—1980 гг. потребление энергии возросло всего в 1,2 раза при увеличении объема промышленной продукции в 1,5 раза. Это объясняется структурными изменениями в производстве и рационализацией использования энергоресурсов. В период 1985—1990 гг. в связи с внедрением электрофизических и электрохимических методов обработки металла, использованием манипуляторов и робототехники, созданием поточных и автоматических линий можно ожидать повышения потребления энергии.

Такое же влияние окажет внедрение электротермических процессов: замена вагранок индукционными печами, переход на электроплавку всего прироста стального литья. Но, с другой стороны, благодаря совершенствованию станочного парка, кузнечно-прессового оборудования, опережающему развитию менее электроемких и материалоемких структур подотраслей и принятым мерам по экономии энергии электроемкость будет снижаться.

В результате электроемкость снизится с 768 кВт·ч/т в 1970 г. и 660 кВт·ч/т в 1980 г. до 570 кВт·ч/т в 1985 г., т. е. почти на 15 %.

В строительстве в 1981—1985 гг. потребление электроэнергии возрастет на 5 % при увеличении объемов капитальных вложений на 11,2 %. Рост электропотребления объясняется тем, что ручной труд будет вытесняться применением электроинструментов, использованием транспортных механизмов, подъемных кранов, бетононасосов и т. п.

На железнодорожном транспорте будет продолжаться электрификация. Протяженность электрифицированных железных дорог в 1980 г. достигла 47 тыс. км и составила одну треть протяженности всей железнодорожной сети, доля электротяги достигла 54,7 % в работе всех локомотивов железных дорог. Себестоимость перевозок при электротяге на 35 %, а в пригородных поездах в 2,4 раза ниже, чем на неэлектрифицированных линиях.

В 1981—1985 гг. намечено электрифицировать еще 6 тыс. км железных дорог, а объем перевозок электрифицированным транспортом увеличить на 19,6 % при общем росте грузооборота по железным дорогам на 10 %.

Рост потребления электроэнергии будет несколько отставать от роста грузоперевозок и составит 18 %. Это предполагается достигнуть за счет таких мероприятий, как внедрение рекуперативного торможения, увеличение массы поездов, расширение использования роликовых подшипников, модернизация контактной сети и тяговых подстанций. Эффект этих мероприятий компенсирует рост энергопотребления, вызванный увеличением скорости движения поездов, ростом парка вагонов с электроотоплением и кондиционированием и т. п.

Городской электрифицированный транспорт к 1985 г. увеличит потребление электроэнергии на 11 % вследствие повышения объема перевозок, строительства метрополитенов в Новосибирске, Минске, Ереване, Горьком и увеличения протяженности линий.

В трубопроводном транспорте нефти и нефтепродуктов, полностью электрифицированном, предусматриваются увеличение к 1985 г. протяженности магистральных трубопроводов до 85 тыс. км и увеличение перекачки нефти и нефтепродуктов на 8 %, что потребует увеличения электропотребления на 23,3 млрд. кВт·ч.

В транспорте газа, как показали исследования, в ряде районов целесообразно вместо газоприводных компрессорных установок использовать электроприводные, например там, где имеются мощные энергосистемы с атомными электростанциями. В 1985 г. при росте протяженности газопроводов до 175 тыс. км (на 34 %) потребление энергии с учетом развития электроприводных компрессоров возрастет в 1,8 раза и достигнет 20 млрд. кВт·ч.

В табл. 1.18 дана сводная характеристика электропотребления всеми видами транспорта.

В сельскохозяйственном производстве быстрыми темпами идет процесс индустриализации создания крупных специализированных комплексов, что связано с ростом электропо-

Таблица 1.18. Сводная характеристика электропотребления всеми видами транспорта

Вид транспорта	Потребление электроэнергии, млрд. кВт·ч			Доля в общем электропотреблении, %		
	1975 г.	1980 г.	1985 г. (план)	1975 г.	1980 г.	1985 г. (план)
Железнодорожный электрифицированный	43,1	48,7	57,5	58,1	47,4	45
Городской	6,7	8,1	9	9	7,9	7
Трубопроводный	13,5	31,9	43	18,2	31,1	34
Прочие виды	10,9	14	17	14,7	13,6	14
Всего	74,2	102,7	126,5	100	100	100

требления, как это видно из табл. 1.19, в которой показано также потребление электроэнергии на производственные цели (животноводство, птицеводство, растениеводство, подсобные предприятия) и на коммунально-бытовые нужды. Электровооруженность труда воз-

Таблица 1.19. Объем и структура потребления электроэнергии в сельском хозяйстве

Сельские потребители электроэнергии	Потребление электроэнергии, млрд. кВт·ч			Доля в общем потреблении, %		
	1935 г.	1980 г.	1985 г. план	1975 г.	1980 г.	1985 г. план
Всего потребление сельским хозяйством	73,8	111	142	100	100	100
В том числе на производственные цели	53,9	83,7	106,8	73	75,4	75,2
Из них:						
в животноводстве и птицеводстве	30,8	45	60	41,8	40,6	42,2
в растениеводстве	16,1	26,7	32	21,8	24	22,5
в подсобных предприятиях	7	12	14,8	9,4	10,8	10,3
на коммунально-бытовые нужды	19,9	27,3	35,2	27	24,6	24,5

растет в 1985 г. в 1,4 раза по сравнению с 1980 г. и достигнет 4,9 тыс. кВт·ч на одного работающего. При росте объемов производства на 12—14 % электроемкость его возрастет в 1,3 раза. Опережающее электропотребление вызвано индустриализацией производства для повышения производительности труда и необходимостью обеспечения повышенного уровня жизни и быта.

В жилищно-коммунальном хозяйстве электрификация имеет важное значение для повышения уровня жизни и быта людей. Улучшение обеспеченности населения жилой площадью, расширение номенклатуры бытовых приборов и объема их производства (табл. 1.20), увеличение использования электроэнергии для приготовления пищи, расширение торговли и сферы услуг требуют увеличения электропотребления, как это показано в табл. 1.21.

Таблица 1.20. Обеспеченность населения бытовыми электроприборами

Вид прибора	Количество приборов на 100 семей		
	1971 г	1980 г.	1985 г. (план)
Радиоприемники и радиолы	79	86	89
Телевизоры	74	85	90
Магнитофоны	15	24	28
Холодильники	61	84	95
Стиральные машины	65	71	68
Электропылесосы	18	29	38
Электроутюги	82	97	100

Таблица 1.21. Потребление электроэнергии на коммунально-бытовые нужды, млрд. кВт·ч

Структура потребления электроэнергии	1975 г.		1980 г.		1985 г. (план)	
	В городах	В сельской местности	В городах	В сельской местности	В городах	В сельской местности
Жилой сектор—всего	43	13,6	57,1	17,4	70,0	22,2
В том числе:						
освещение квартир	13,6	4,2	16,0	5,9	20,0	7,7
электробытовые приборы	20,8	6,9	31,0	7,8	40,4	9,2
приготовление пищи	4,2	1,6	5,1	2,0	6,6	2,8
низкотемпературные процессы	4,4	0,9	5,0	1,7	7,0	2,5
Общественный сектор — всего	76,1	6,3	97,9	9,9	116,2	14,0
В том числе:						
освещение и силовые нужды общественных зданий	51,7	4,6	58,4	7,1	62,4	9,5
освещение улиц	3,8	0,4	4,3	0,7	6,6	1,0
водопровод и канализация	14,3	0,2	19,7	0,4	23,0	0,7
приготовление пищи	5,8	1,0	12,0	1,2	14,2	1,7
низкотемпературные процессы	0,5	0,1	3,5	0,5	5,0	1,1
Всего на коммунально-бытовые нужды	119.1	19,9	155	27,3	190,2	35,2

В результате потребление энергии за период с 1980 по 1985 г. намечено увеличить с 928 кВт×ч на жителя в городе до 1053 кВт·ч и в сельской местности с 277 кВт·ч на жителя до 750 кВт·ч (почти в 3 раза).

1.4. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Характеристика электротехнической промышленности

Развитие электротехнической промышленности имеет большое значение для решения задач по дальнейшей электрификации страны, механизации и автоматизации производственных процессов во всех сферах народного хозяйства. Масштабы производства электротехнической промышленности, ее технический уро-

вень, качество и надежность ее продукции оказывают огромное влияние практически на все производственные процессы в других видах промышленности, на улучшение условий труда и быта.

Среди других машиностроительных производств электротехническая промышленность занимает второе место по объему производства, численности рабочих, количеству производственных объединений, предприятий и научно-исследовательских институтов.

Вся электротехническая продукция, включающая в себя более 60 тысяч изделий, предназначается прямо или косвенно для электрификации народного хозяйства и используется в процессах производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Структура электротехнической продукции по функциональным ее направлениям видна из табл. 1.22.

Таблица 1.22. **Структура электротехнической продукции по функциональному назначению**

Назначение электротехнической продукции	Доля в общем объеме производства, %
Генерирование электрической энергии	9
Передача и распределение электрической энергии	31
Потребление электрической энергии	57
Средства связи	3

Электротехническая промышленность относится к отраслям народного хозяйства с высокими темпами развития: за последние 17 лет объем промышленного производства возрос в 3,5 раза, основные фонды — в 3,9 раза, производительность труда — 2,7 раза. Доля в общем объеме промышленного производства возросла с 1,6 до 1,85 %. Динамика отдельных производственных направлений электротехнической промышленности за последние 20 лет характеризуется данными табл. 1.23.

Таблица 1.23. **Динамика производственных направлений в электротехнической промышленности**

Подотрасль электротехнической промышленности	Доля в общем объеме выпуска электротехнической промышленности, %				
	1965 г.	1970 г.	1975 г.	1980 г.	1985 г. (план)
Электромашиностроение	17,4	16,4	16,0	15,9	15,5
Трансформаторостроение	3,8	3,5	3,5	3,4	3,3
Высоковольтное аппаратостроение	3,9	3,8	4,1	4,3	4,3
Конденсаторостроение	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7
Низковольтное аппаратостроение	9,3	9,5	9,8	10,4	10,2
Электровозостроение	2,6	2,2	2,0	2,0	2,5
Транспортное электрооборудование	1,5	1,7	1,5	1,5	1,5
Преобразовательная техника	1,6	1,6	1,8	2,0	2,4
Светотехническое оборудование	3,8	6,2	6,0	5,9	6,0
Химические источники тока	6,4	6,1	6,0	5,6	6,0
Электросварочное оборудование	2,2	2,4	2,3	2,2	2,5
Электротермическое оборудование	1,2	1,2	1,3	1,5	1,8
Кабельная промышленность	29,3	27,7	25,2	23,6	21,6
Электротехнический фарфор	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1
Электроизоляционные материалы	3,7	3,5	3,5	3,4	3,5
Товары народного потребления	6,4	7,0	9,1	10,0	10,5
Прочая продукция	5,1	5,5	6,2	6,6	6,6

Качественные изменения в отраслевой структуре электротехнической промышленности связаны с развитием отраслевой науки и техники. Объем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ за 1965—1983 гг. вырос в 3,92 раза. Экономический эффект от использования новой техники в народном хозяйстве увеличился за этот период в 12 раз. Срок от поисковых исследований до освоения новых изделий сократился в 1,5—2 раза. В 1983 г. выпуск изделий с государственным Знаком качества в общем объеме товарной продукции достиг 48,7 %, а выпуск изделий второй категории снизился до 0,6 %. В последние годы отраслью осваиваются ежегодно около 1500 новых видов изделий и снимаются с производства более 500 устаревших видов продукции.

Электротехническая промышленность, развиваясь опережающими темпами по сравнению с ростом всей промышленности, оказывает существенное влияние на развитие многих отраслей народного хозяйства. По комплексу решаемых задач электротехническая промышленность занимает особое место в системе взаимоотношений с отраслями народного хозяйства и от сбалансированного пропорционального ее развития в значительной степени зависят конечные результаты экономического и социального развития страны.

Повышение эффективности использования материальных ресурсов в отрасли

Важнейшим требованием повышения эффективности общественного производства является обеспечение рационального использования материальных ресурсов и снижение материалоемкости продукции.

Важность решения проблемы снижения материалоемкости продукции электротехнической промышленности обусловлена тем, что материальные затраты (на сырье, материалы, топливо и электроэнергию, покупные изделия и полуфабрикаты) в структуре затрат на производство составляют свыше 70 %. Поэтому в электротехнической промышленности проблеме экономии всех видов ресурсов уделяется первостепенное значение. При решении этой задачи в отрасли последовательно отрабатывался и внедрялся большой комплекс мер, обеспечивающих увязку требований научно-технического прогресса и экономии ресурсов с вопросами экономического и социального развития трудовых коллективов.

Эти меры одобрены постановлением ЦК КПСС «О работе Министерства электротехнической промышленности по экономии материальных и трудовых ресурсов в свете решений XXVI съезда КПСС», опубликованным 2 июня 1982 г., и рекомендованы к широкому распространению во всех отраслях народного хозяйства.

В табл. 1.24 приведена динамика структуры материальных затрат в электротехнической промышленности.

Таблица 1.24. **Динамика структуры материальных затрат в электротехнической промышленности**

Элементы затрат	1970 г.	1975 г.	1980 г.	1985 г. (план)
Сырье и материалы (основные и вспомогательные)	75,62	72,64	69,19	66,69
Покупные изделия и полуфабрикаты	21,06	24,00	27,34	29,82
Топливо и электроэнергия	3,32	3,36	3,47	3,49
Итого:	100,0	100,0	100,0	100,0

В результате осуществления комплекса мероприятий по созданию новых и модернизации выпускаемых электротехнических изделий, разработке и внедрению новых технологических процессов, использованию современных материалов в период 1976—1980 гг. снижены нормы расхода проката черных металлов на 329, проката цветных металлов — на 20, свинца — на 19 тыс. т. Прирост расхода проката черных металлов в 1976—1980 гг. составил 4,9 %, а удельная норма расхода проката черных металлов снижена на 18,7 % (с 232 до 189 т/млн. руб. в 1980 г.), медного проката — на 14,5 %, латунного — на 17,4 %, серебра — на 35 %. В результате при росте за период 1975—1980 гг. объема производства продукции на 28,9 % за этот же период потребление проката цветных металлов увеличилось на 13,8%, меди — на 2,2 %, свинца и олова — соответственно на 5,3 и 8,4 %.

За последние 11 лет нормы расхода цветных металлов для электродвигателей мощностью до 100 кВт снижены на 24 %, что обеспечило увеличение производства электродвигателей в 1,7 раза без увеличения потребления проката и электротехнических сталей, для производства низковольтной аппаратуры — на 42 %, для трансформаторов — на 11 %, для крупных электрических машин — на 29 %, для товаров народного потребления — на 46%.

Выполнение заданий по экономии проката черных и цветных металлов приведено в табл. 1.25.

Таблица 1.25. **Экономия проката черных и цветных металлов в электротехнической промышленности, %**

Наименование материалов	1976—1980 гг.	1981—1985 гг. (план)	1981—1983 г. (фактическое выполнение)
Прокат черных металлов	13,5	15,5	10,63
Прокат медный	12,2	15,6	13,8
Прокат латунный	17,6	16,0	20,4
Прокат алюминиевый	4,5	5,3	12,7

Основная экономия проката черных и цветных металлов получена за счет создания и внедрения в производство новых конструкций изделий с меньшей удельной материалоемкостью и совершенствования технологии производства, что видно из данных табл. 1.26.

Таблица 1.26. **Структура экономии проката черных и цветных металлов по факторам снижения, %**

Группа факторов экономии	1975 г.		1980 г.		1985 г. (план)	
	Прокат черных металлов	Прокат цветных металлов	Прокат черных металлов	Прокат цветных металлов	Прокат черных металлов	Прокат цветных металлов
Внедрение экономичных видов сырья и материалов	13,0	15,5	13,5	20,5	12,0	15,0
Совершенствование конструкций изделий	53,5	32,5	55,5	34,5	59,5	44,0
Внедрение новой техники и совершенствование технологии производства	22,0	52,0	20,0	45,0	20,0	41,0
Совершенствование организации производства и прочие факторы	11,5	—	11,0	—	8,5	—

Значительную экономию материальных ресурсов обеспечивают новые разработки единых унифицированных серий электрооборудования, осуществляемых по комплексным программам.

Основным критерием экономного расходования материалов является коэффициент использования материала. На протяжении ряда лет этот коэффициент по прокату черных металлов колеблется в пределах 0,67—0,68 (в целом по машиностроению он равен 0,711). В настоящее время коэффициент использования электротехнической стали в электромашиностроении равен 0,523, при этом потери и отходы стали составляют около 285 тыс. т в год. Теоретически возможный коэффициент использования может быть доведен до 0,60—0,62, в этом случае неминуемые потери должны уменьшиться до 220—230 тыс. т.

В трансформаторостроении коэффициент использования электротехнических сталей находится на уровне 0,88—0,90, а на отдельных видах трансформаторов — до 0,94.

Существенную экономию даст совершенствование технологических процессов. В первую очередь сюда относятся внедрение многорядной шахматной штамповки листов магнитопроводов электрических машин (до 10—12% экономии), а также применение заготовок, полученных на станках поперечно-клиновой прокатки для изготовления валов электродвигателей (до 15—18 % экономики проката).

В текущей пятилетке планируется широкое внедрение малоотходной и безотходной технологии, высокопрочного чугуна, литья по выплавляемым моделям и др. За счет использования улучшенного качества металла и экономичных профилей намечается сэкономить 40 тыс. т металла, за счет применения заменителей — 38 тыс. т.

Обобщающим показателем эффективности использования материальных ресурсов являет-

ся показатель материалоемкости продукции, определяемый как отношение в стоимостном выражении объема всей совокупности материальных затрат к объему производственной валовой (товарной) продукции. Этот показатель по электротехнической промышленности составил: в 1970 г. — 0,677, в 1975 г. — 0,662, в 1980 г. — 0,641 и по плану на 1985 г. он будет достигнут 0,612. В 1980 г. по отношению к 1970 г. материалоемкость продукции снизилась на 5,3 %.

Основные направления экономии трудовых ресурсов

Производительность труда — важнейший экономический показатель, в котором в концентрированном виде отражается степень совершенства техники, технологии, организации и управления производством. Увеличение производительности труда приобретает особо важное значение в условиях научно-технической революции и сокращения резервов прироста рабочей силы.

Электротехническая промышленность добилась определенных успехов в повышении производительности труда. За 1966—1983 гг. производительность труда возросла в 2,7 раза при среднегодовом темпе прироста 5,7 %.

В электротехнической промышленности разработана и осуществляется комплексная программа экономии трудовых ресурсов на 1981—1985 гг. Основную экономию трудовых ресурсов, как и в 1976—1980 гг., предусматривается получить за счет разработки и освоения в производстве новых изделий с улучшенными технико-экономическими и эксплуатационными характеристиками, более технологичных в производстве, изготовления узлов и деталей этих изделий по прогрессивной малоотходной технологии на автоматизированном оборудовании и сборки — на комплексно-механизированных рабочих местах и автоматизированных линиях.

За последние 13 лет прирост производительности труда за счет мероприятий научно-технического прогресса составил от 60 до 80 %. При этом более 50 % высвобождения работников по техническим факторам получено в результате совершенствования технологии, более 20 % — за счет повышения уровня механизации производства, около 10 % — автоматизации производства и около 15 % — модернизации действующего оборудования, освоения новых видов продукции и других мероприятий.

В табл. 1.27 приведены данные использования трудовых ресурсов.

Как видно из приведенных данных, среднегодовой темп прироста производительности труда составил за три года текущей пятилетки 5,7 % при достигнутых в 1976—1980 гг. 4,2 %. Значительно перевыполнены задания пятилетки по росту объемов производства и производительности труда. Это достигнуто за счет интенсивного проведения мер по экономии трудовых ресурсов.

Уровень технической оснащенности производства находит свое отражение в показателе фондовооруженности на одного работающего, которая в отрасли возросла в 1976—1980 гг. на 49 % против 34 % в 1971—1975 гг. На 1981—1985 гг. рост фондовооруженности запланирован в размере 40,3 %. В абсолютном выражении фондовооруженность одного работающего в 1985 г. должна составить 10,62 тыс. руб.

Таблица 1.27. **Основные показатели использования трудовых ресурсов в электротехнической промышленности**

Показатель	1976—1980 гг.	1981—1985 гг. (план)	1981—1983 гг. (отчет)
Рост объема производства, %	130,6	131,1	119,5
Рост производительности труда, %	123,1	124,8	118,0
Прирост производительности труда за счет мероприятий научно-технического прогресса, %	73,0	78,0	76,0
Прирост объема производства за счет повышения производительности труда, %	80,0	84,0	94,0
Степень механизации труда рабочих, %	48,3	54,0	50,9
Доля рабочих, занятых ручным трудом, к общей их численности, %	40,5	32,9	36,9

На изоляционно-обмоточном и изоляционно-пропиточном производствах в текущей пятилетке внедряется ряд новых технологических процессов с оснащением комплексно-механизированными линиями в точном исполнении, изготовление которых осуществляется на собственной машиностроительной базе отрасли. Выполнение всего комплекса мероприятий позволит высвободить около 24 тыс. чел. и существенно повысить степень механизации труда рабочих.

На слесарно-сборочных работах в настоящее время в отрасли занято около 160 тыс. рабочих, а степень механизации их труда составляет 27,2 %. Проводится широкое внедрение комплексной механизации и автоматизации этих технологических процессов, создание и внедрение полуавтоматических и автоматических линий сборки для электродвигателей массовых серий, автоматизация отдельных сборочных операций с помощью промышленных роботов. Это позволит за пятилетие высвободить на слесарно-сборочных работах около 55 тыс. чел. (за три года высвобождено около 30 тыс. чел.) и повысить степень механизации труда до 35 %.

Большой объем работ проводится по совершенствованию технологии механообработки, где занято более 70 тыс. чел.

На погрузочно-разгрузочных, транспортных, складских и упаковочных работах в отрасли занято более 106 тыс. рабочих. При этом степень охвата механизированным трудом на складских и упаковочных работах составляет всего лишь 3 %. В текущей пятилетке намечено внедрить 30 систем централизованного транспортного обслуживания, 1745 механизированных складов, 2330 единиц напольного безрельсового транспорта, 40 тыс. м конвейеров. Это позволит за пятилетие довести степень механизации труда рабочих до 54,3 %.

Повышение технического уровня литейных работ осуществляется за счет внедрения высокопроизводительного специального литейного оборудования (автоматических линий формообразования, индукционных печей, регенерационных установок) и прогрессивных технологических процессов. Если производство отливок в отрасли на автоматических линиях в 1980 г. составляло 4,76 % к общему объему производства литья, то в 1985 г. эта доля возрастет до 12,9 %, а доля литых заготовок, изготовляемых с применением прогрессивных технологических процессов, возрастет с 33 до 59 %.

В результате реализации мероприятий по повышению технического уровня производства в 1981—1985 гг. условно будет высвобождено более 245 тыс. чел., а степень охвата рабочих механизированным трудом повысится с 48,3 % в 1980 г. до 54 % в 1985 г. Численность рабочих, занятых ручным трудом, за этот период сократится более чем на 37 тыс. чел.

Совершенствование хозяйственного механизма управления отраслью

Дальнейшее совершенствование хозяйственного механизма является одним из решающих условий повышения эффективности и интенсификации общественного производства.

В условиях научно-технической революции повышается роль и ответственность отраслей за конечные народнохозяйственные результаты, что выдвигает ряд новых требований к отраслевому управлению наукой и техникой, совершенствованию методологии и практики планирования и стимулирования развития отраслей промышленности.

В электротехнической промышленности уделяется большое внимание совершенствованию методов планирования, усилению экономических рычагов и стимулов на конечные результаты работы каждого предприятия и отрасли в целом.

На основе экономического эксперимента по совершенствованию методов экономического управления научно-техническим прогрессом, проводимого в электротехнической промышленности с 1969 г., была разработана и внедрена новая система планирования, финансирования и экономического стимулирования новой техники. Основные принципы этой системы нашли широкое практическое применение во многих отраслях промышленности.

Система управления на народнохозяйственном уровне должна обеспечить в ходе эксперимента решение крупных комплексных проблем развития науки и техники. Отраслевая система должна строиться на основе принципов общей системы управления развитием науки и техники с учетом специфики отрасли материального производства и задач, поставленных перед ней на том или ином этапе ее развития. В связи с этим представляет интерес система комплексного управления научно-техническим прогрессом в электротехнической промышленности.

Сложившиеся к настоящему времени в электротехнической промышленности методы планирования новой техники отличаются рядом принципиальных особенностей. Прежде всего здесь внедрено сквозное планирование на базе заказов-нарядов, которые охватывают все стадии работ по темам, начиная от научного поиска и опытных работ до серийного выпуска нового изделия или до внедрения в производство технологического процесса.

Планирование новой техники в отрасли базируется на аттестации качества выпускаемых изделий, цель которой — определение соответствия каждого производимого предприятиями отрасли вида продукции достигнутому мировому уровню и современным требованиям народного хозяйства, разработка рекомендаций по совершенствованию технико-экономических показателей изделий, а также снятие с производства устаревших видов продукции.

Совершенствованные системы планирования новой техники, необходимость обоснованного отбора наиболее эффективных направлений технического прогресса потребовали обеспечения единой системы оценки экономического эффекта, получаемого в народном хозяйстве от мероприятий по техническому прогрессу. Экономический эффект стал объектом планирования и оценки хозрасчетной деятельности предприятий.

Финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, подготовка и освоение серийного производства изделий осуществляется за счет одного источника — единого фонда развития науки и техники. Он образуется в отрасли за счет отчислений от плановой прибыли по нормативу, установленному по годам пятилетки. Образование единого источника финансирования позволило сосредоточить финансовые ресурсы на важнейших направлениях технического прогресса, связать в единое целое работу институтов и заводов, шире внедрять принцип хозяйственного расчета в научных организациях.

Таким образом, экономический механизм управления научно-техническим прогрессом, разработанный в электротехнической промышленности, охватывает систему планирования, финансирования, ценообразования, материального стимулирования и т. д. Комплексный подход как основное методологическое требование к совершенствованию системы управления научно-техническим прогрессом позволил повысить конечную результативность как каждой составляющей хозяйственного механизма, так и системы в целом. Вместе с тем системный подход в управлении научно-техническим прогрессом обеспечил единство всего цикла «наука — техника — производство», что дало возможность повысить эффективность развития науки и техники и значительно сократить период от научного поиска до внедрения в производство.

Комплексная система управления научно-техническим прогрессом в отрасли дала ощутимые результаты: значительно повысился экономический эффект от внедрения научно-технических разработок и сократились сроки их внедрения в производство. Так, экономический эффект в 1983 г. возрос по сравнению с 1963 г. почти в 7 раз, а его сумма за 1969—1983 гг. составила 16 млрд. руб.

Обеспечение единства принимаемых технических решений с оценкой их народнохозяйственного эффекта на всех уровнях научного, технического и хозяйственного руководства от-

раслью позволило более экономически обоснованно отбирать новые научные и технические решения, принимать меры по повышению их экономической эффективности. Уже к 1971 г. резко сократилось количество малоэффективных изделий, а экономический эффект, приходящийся на один рубль единого фонда развития науки и техники, возрос с 1 р. 42 к. в 1968 г. до 3 р. 56 к. в 1983 г.

Существенную роль в ускорении темпов научно-технического прогресса сыграл новый показатель роста объемов производства с учетом качества и эффективности выпускаемой техники. В этих целях по каждому новому изделию высшей категории качества определяется доля экономического эффекта от производства и использования продукции в планируемом периоде.

С 1979 г. отрабатывались новые методы планирования экономического и социального развития отрасли, введены новые экономические показатели, более тесно увязывающие конечные результаты научно-технического прогресса с хозрасчетной деятельностью предприятий.

Большое влияние на улучшение хозрасчетной деятельности отрасли оказали меры, внедренные в электротехнической промышленности в соответствии с постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 12 июля 1979 г. «Об улучшении планирования и усилении воздействия хозяйственного механизма на повышение эффективности производства и качества работы».

И, наконец, с 1 января 1984 г. в электротехнической промышленности проводится крупномасштабный экономический эксперимент в соответствии с постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 14 июля 1983 г. «О дополнительных мерах по расширению прав производственных объединений (предприятий) промышленности в планировании и хозяйственной деятельности и по усилению их ответственности за результаты работы».

Цели экономического эксперимента — отработать новые, более совершенные формы и методы хозяйствования на базе расширения прав и ответственности предприятий, действенность экономических нормативов и рычагов для планирования и стимулирования трудовых коллективов за результаты их работы, открыть новые возможности для развития инициативы, социалистической предприимчивости и активности трудящихся для обеспечения всемерного роста эффективности производства.

Основные положения экономического эксперимента заключаются в следующем:

во-первых, создаются такие экономические, материальные и моральные условия, при которых производственные коллективы заинтересованы принимать напряженные плановые задания. Важную роль при этом играют стабильные экономические нормативы как инструмент централизованного планирования;

во-вторых, дальнейшее повышение технического уровня производства осуществляется за счет собственных и заемных средств. Централизованные капитальные вложения выделяются только на реконструкцию и новое строительство;

в-третьих, производственным коллективам гарантируется выделение фонда заработной платы и фондов поощрения по утвержденным нормативам, обеспечение материально-техническими ресурсами и сбыт готовой продукции.

в-четвертых, предприятие осуществляет хозрасчетную деятельность и несет ответственность перед государством и партнерами за конечные результаты работы.

Предприятиям централизованно утверждается ограниченный круг показателей. В годовых планах экономического и социального развития утверждаются только следующие показатели:

объем реализуемой продукции — для оценки выполнения обязательств по поставкам продукции;

производство продукции в натуральном выражении, включая изделия новой техники и продукцию на экспорт;

основные задания научно-технических программ по разработке, освоению и внедрению новой техники, технологических процессов и по научной организации труда;

рост производительности труда, исчисляемый по нормативной чистой продукции, с учетом доли экономического эффекта от применения у потребителя высокоэффективной продукции высшей категории качества;

удельный вес продукции высшей категории качества в общем объеме производства;

прибыль;

снижение затрат на рубль товарной продукции;

лимиты государственных централизованных капитальных вложений, ввод в действие основных фондов, производственных мощностей и объектов за счет государственных централизованных капитальных вложений;

фонды на основные виды материально-технических ресурсов.

Остальные показатели, предусмотренные действующей системой формирования государственного плана и статистической отчетностью, определяются и утверждаются предприятиями самостоятельно и сообщаются вышестоящей организации, территориальным планирующим организациям и местным органам ЦСУ СССР.

В пятилетнем плане каждому предприятию утверждаются экономические нормативы. Они разрабатываются и доводятся в составе контрольных цифр заблаговременно, до начала составления пятилетнего плана. Утвержденные предприятием в пятилетнем плане экономические нормативы изменению и переутверждению в годовых планах не подлежат. Принципиальная особенность экономических нормативов состоит в том, что они являются едиными для всех производственных объединений и предприятий.

На 1984—1985 гг. предприятиям и организациям электротехнической промышленности установлены следующие экономические нормативы:

Норматив прироста фонда заработной платы промышленно-производственного персонала за каждый процент прироста нормативной чистой продукции, % . . .	0,35
Норматив прироста фонда материального поощрения за каждый процент снижения затрат на рубль товарной продукции, %	5,0
Норматив прироста фонда социально-культурных мероприятий и жилищного строительства за каждый процент прироста производительности труда, %	2,0

Нормативы образования фонда развития производства:	
от прибыли, %	8,1
от амортизационных отчислений, предназначенных для полного восстановления основных фондов, %	40,0
Норматив образования фонда заработной платы работников научно-исследовательских организаций в процентах к общему научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, %	3,63
Норматив прироста объема затрат на научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы за каждый процент прироста товарной продукции, %	1,0
Норматив образования единого фонда развития науки и техники в процентах к товарной продукции, %	3,86

Указанные нормативы гарантируют предприятиям увеличение соответствующих фондов в зависимости от напряженности плановых показателей и на этой основе обеспечивают заинтересованность в более активном использовании внутрипроизводственных резервов.

Фонд заработной платы по плану на очередной год образуется из суммы фонда заработной платы базового года и дополнительного фонда, исчисленного по нормативу прироста за каждый пункт прироста нормативной чистой продукции (с учетом доли экономического эффекта от производства и применения у потребителя новых электротехнических изделий высшей категории качества).

Для предприятий, допустивших перерасход фонда заработной платы, базовый фонд определяется за вычетом суммы перерасхода этого фонда. Базовый фонд заработной платы увеличивается на сумму относительной экономии по фонду заработной платы, числящейся за предприятиями на конец года.

Базовый фонд заработной платы сохраняется при условии, если рост производительности труда по плану и фактически за год превышает или равен среднегодовому росту производительности труда за пять лет, предшествующих плановому. При несоблюдении указанного условия фонд заработной платы базового года, уменьшается за каждый процент снижения производительности труда в размере, равном величине утвержденного норматива прироста фонда заработной платы.

В таком же порядке определяются плановые и фактические фонды поощрения.

В целях более эффективного использования средств для стимулирования предприятиям предоставлено право создавать единый фонд материального поощрения, в котором объединяются все источники премирования. Смета расходов единого фонда согласовывается с трудовым коллективом, утверждается руководителем предприятия и направляется на стимулирование повышения эффективности производства.

Важным показателем становится объем реализации с учетом выполнения договорных обязательств. За каждый процент недовыполнения планового задания по объему реализации продукции с учетом обязательств по поставкам фонд материального поощрения уменьшается на 3 %. При выполнении договорных обязательств на 100 % фонд материального поощрения увеличивается на 15 %.

Большие права предоставлены по использованию фонда развития производства. Накопленные средства этого фонда изъятию не подлежат. Предприятия получили возможность за счет собственных источников осуществлять долгосрочную программу технического перевооружения производства. Материально-технические ресурсы на эти цели предусматриваются в государственном плане.

Список литературы

1.1. **План** электрификации РСФСР. Доклад VIII съезду Советов Государственной комиссии по электрификации России. 2-е издание. М.: Государственное издательство политической литературы, 1955. 650 с.

1.2. **60 лет** Ленинского плана ГОЭЛРО/Под ред. П. С. Непорожнего. М.: Энергия, 1980. 405 с.

1.3. **Стеклов В. Ю.** В. И. Ленин и электрификация. М.: Наука, 1982. 512 с.

1.4. **Энергетика** СССР в 1980—1985 годах/П. К. Аксютин, Г. А. Веретенников, М. С. Воробьев и др.; Под ред. А. М. Некрасова, А. А. Троицкого. М.: Энергоиздат, 1981. 352 с.

1.5. **Основные** положения Энергетической программы СССР на длительную перспективу. М.: Политиздат, 1984. 32 с.

Раздел 2

ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. ВАЖНЕЙШИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

СОДЕРЖАНИЕ

2.1. Международная система единиц (СИ, SI) Основные единицы СИ (25). Дополнительные единицы СИ (25) 25

2.2. Единицы механических величин . . . Системы единиц в механике (25). Единицы механических величин в Международной системе (25). Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ (27). Пересчет единиц энергии (27). Пересчет единиц мощности (27). Пересчет единиц момента инерции и махового момента (27). Метрические и неметрические единицы длины, площади, объема, массы, работы и энергии, мощности, давления, скорости частоты вращения (28). Децибел и непер (29) 25

2.3. Единицы тепловых, акустических и световых величин, величин, характеризующих ионизирующие излучения и радиоактивность 30
Единицы тепловых величин в Международной системе (31). Единицы акустических величин в Международной системе (31). Единицы световых величин в Международной системе (31). Единицы величин, характеризующих ионизирующие излучения и радиоактивность в Международной системе (32)

2.4. Единицы электрических и магнитных величин 33
Единицы Международной системы (33).
Единицы электрических и магнитных величин, допускавшиеся наравне с единицами СИ до 01.01.1980 г. (35)
2.5. Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц и их наименования 35
2.6. Важнейшие физические постоянные (фундаментальные константы) 35
2.7. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева 36
2.8. Буквенные обозначения основных электрических и магнитных величин . . . 37
Список литературы 38

2.1. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ, SI)

Основные единицы СИ

1. Метр (м, m) — единица длины. Метр равен 1650763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86 [1].

2. Килограмм (кг, kg) — единица массы. Килограмм равен массе международного прототипа килограмма.

3. Секунда (с, s) — единица времени. Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

4. Ампер (А) — единица силы электрического тока. Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

5. Кельвин (К) — единица термодинамической температуры. Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды.

6. Моль (моль, mol) — единица количества вещества. Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.

7. Кандела (кд, cd) — единица силы света. Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.

Кроме температуры Кельвина (обозначение T) допускается применять также температуру Цельсия (обозначение t), определяемую выражением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273{,}15$ К по определению. По размеру градус Цельсия (обозначение °С) равен кельвину. Интервал или разность температур Кельвина выражают в кельвинах. Интервал или разность температур Цельсия допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия. Обозначение Международной практической температуры в Международной практической температурной шкале 1968 г., если ее необходимо отличать от термодинамической температуры, образуется путем добавления к обозначению термодинамической температуры индекса 68 (например, T_{68} или t_{68}).

Примечания: 1. Электрические и магнитные единицы СИ образованы в соответствии с рационализованной формой уравнений электромагнитного поля.

2. В системе СИ для измерения температуры принята термодинамическая температурная шкала.

3. С Международной системой единиц СИ совпадают четыре частные системы, применявшиеся до ее введения в отдельных областях науки и техники:

МКС (м, кг, с) — например, в механике и акустике;

МКСГ (м, кг, с, К) — например, в молекулярной физике, термодинамике и теплотехнике;

МКСА (м, кг, с, А) — например, в электротехнике при электрических измерениях;

МСС (м, с, кд) — например, в фотометрии, светотехнике.

Дополнительные единицы СИ

1. Радиан (рад, rad) — единица плоского угла. Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу (1 рад = 57°17′44,8″).

2. Стерадиан (ср, sr) — единица телесного угла. Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

2.2. ЕДИНИЦЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Системы единиц в механике

В основу построения систем единиц в механике положены три основные независимые единицы. Первые две — единицы длины и времени. Системы, в которых в качестве третьей основной единицы взята единица массы, называют динамическими и часто еще абсолютными. Системы с третьей основной единицей — единицей силы — называют статическими.

Единицы механических величин в Международной системе

Выражение через единицы СИ может служить для проверки получаемых уравнений и для перехода к другим единицам. При этом необязательно выражать рассматриваемые единицы через основные. Поэтому в табл. 2.2 кроме выражений через основные единицы указаны и практически наиболее удобные формы.

[1] Согласно решению Международного комитета мер и весов с осени 1983 г. вводится новое определение метра как расстояния, которое проходит свет в вакууме за 1/299 792 458-ю долю секунды.

Таблица 2.1. **Системы единиц в механике**

Обозначение системы	Основные и производные единицы					
	длины	массы	времени	силы	работы	мощности
СИ, SI (или МКС, MKS)	1 м (метр)	1 кг (килограмм)	1 с (секунда)	1 кг·м/с²= =1 Н (ньютон)	1 Н·м=1 Дж (джоуль)	1 Дж/с= =1 Вт (ватт)
СГС, CGS (гауссова)	1 см (сантиметр)	1 г (грамм)	1 с (секунда)	1 г·см/с²= =1 дин (дина)	1 дин·см= =1 эрг	1 эрг/с
МКГСС, MKGS (техническая)	1 м (метр)	1 кгс·с²/м= =1 т.е.м. (технич. ед. массы)	1 с (секунда)	1 кгс (килограмм= =сила)	1 кгс·м	1 кгс·м/с

1 м=100 см; 1 кг=1000 г; 1 т. е. м.=9,81 кг.

Примечания: 1. Единицы технической системы МКГСС и системы СГС допускались к применению до 1 января 1980 г.
2 Жирным шрифтом выделены три основные единицы каждой из систем.

Таблица 2.2. **Единицы механических величин в Международной системе СИ**

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единиц системы	
			русское	международное	СГС (гауссовой)	МКГСС (технической)
Длина	метр	м	м	m	100 см	1 м
Масса	килограмм	кг	кг	kg	1000 г	0,102 (т. е. м., 0,102 кгс·с²/м)
Время	секунда	с	с	s	1 с	1 с
Площадь	кв. метр	м²	м²	m²	10^4 см²	1 м²
Объем, вместимость	куб. метр	м³	м³	m³	10^6 см³	1 м³
Сила, вес*	ньютон	кг·м/с²	Н	N	10^5 дин	0,102 кгс
Плотность	килограмм на куб. метр	кг/м³	кг/м³	kg/m³	10^{-3} г/см³	0,102 кгс·с²/м⁴
Момент силы	ньютон-метр	кг·м²/с²	Н·м	N·m	10^7 дин·см	0,102 кгс·м
Работа, энергия	джоуль	кг·м²/с²	Дж	J	10^7 эрг	0,102 кгс·м
Мощность	ватт	кг·м²/с³= =Дж/с	Вт	W	10^7 эрг/с	0,102 кгс·м/с
Давление, механическое напряжение	паскаль	кг/(м·с²)= =Н/м²	Па	Pa	10 дин/см²	0,102 кгс/м²
Количество движения (импульс)	килограмм-метр в секунду	кг·м/с	кг·м/с	kg·m/s	10^5 дин·с	0,102 кгм·с
Момент количества движения (момент импульса)	килограмм-метр в квадрате в секунду	кг·м²/с= =Н·м·с	кг·м²/с	kg·m/s	10^7 эрг·с	0,102 кгс·м·с
Момент инерции (динамический)	килограмм-метр в квадрате	кг·м²	кг·м²	kg·m²	10^7 г·см²	0,102 кгс·м·с²
Скорость	метр в секунду	м/с	м/с	m/s	100 см/с	1 м/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с²	м/с²	m/s²	100 см/с²	1 м/с²
Угловая скорость	радиан в секунду	$с^{-1}$	рад/с	rad/s	1 $с^{-1}$	1 $с^{-1}$
Угловое ускорение	радиан в секунду в квадрате	$с^{-2}$	рад/с²	rad/s²	1 $с^{-2}$	1 $с^{-2}$
Период	секунда	с	с	s	1 с	1 с
Частота периодического процесса**	герц	$с^{-1}$	Гц	Hz	1 $с^{-1}$	1 $с^{-1}$
Частота дискретных событий (импульсов, ударов и т. п.)	секунда в минус первой степени	$с^{-1}$	$с^{-1}$	s^{-1}	1 $с^{-1}$	1 $с^{-1}$
Волновое число	метр в минус первой степени	$м^{-1}$	$м^{-1}$	m^{-1}	0,01 $см^{-1}$	1 $м^{-1}$
Динамическая вязкость	паскаль-секунда	кг/(м·с)	Па·с	Pa·s	10 дин·с/см² (пуаз)	0,102 кгс·с/м²
Кинематическая вязкость	кв. метр в секунду	м²/с	м²/с	m²/s	10^4 см²/с (стокс)	1 м²/с

* Для определения веса тела в ньютонах необходимо его массу, заданную в килограммах, умножить на $g_n \approx 9{,}807$ м/с².

** Октава (окт) — интервал частот, в котором отношение крайних частот равно двум, декада (дек) — интервал частот, в котором отношение крайних частот равно десяти.

Примечание. Временно допускаются к применению единицы частоты вращения: 1 оборот в секунду (1 об/с=1 $с^{-1}=2\pi$ рад/с); 1 оборот в минуту (1 об/мин= =1/60 $с^{-1}=\pi/30$ рад/с).

Таблица 2.3. **Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ**

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	русское	международное	
Длина	астрономическая единица	а. е.	u.a.	$1{,}49598 \cdot 10^{11}$ м (приблизительно)
	световой год	св. год	ly	$9{,}4605 \cdot 10^{15}$ м (приблизительно)
	парсек	пк	pc	$3{,}0857 \cdot 10^{16}$ м (приблизительно)
Масса	тонна	т	t	10^3 кг
	атомная единица массы	а. е. м.	u	$1{,}66057 \cdot 10^{-27}$ кг (приблизительно)
Время	минута	мин	min	60 с
	час	ч	h	3600 с
	сутки	сут	d	86 400 с
Плоский угол	градус	. . . °	. . . °	$(\pi/180)$ рад$\approx 1{,}745329 \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	. . . ′	. . . ′	$(\pi/10\,800)$ рад$\approx 2{,}908882 \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	. . . ″	. . . ″	$(\pi/648\,000)$ рад$\approx 4{,}848137 \cdot 10^{-6}$ рад
Площадь	гектар	га	ha	10^4 м^2
Объем, вместимость	литр	л	l	10^{-3} м^3
Оптическая сила	диоптрия	дптр	—	1 м$^{-1}$
Энергия	электрон-вольт	эВ	eV	$1{,}60219 \cdot 10^{-19}$ Дж (приблизительно)

Примечания: 1. Допускается также применять другие единицы времени, получившие широкое распространение, например: неделя, месяц, год, век, тысячелетие и т. п.
2. Единицу литр не рекомендуется применять при точных измерениях.
3. Приведенные выше единицы времени, плоского угла, астрономическую единицу, световой год, диоптрию и атомную единицу массы не допускается применять с приставками.

Таблица 2.4. **Пересчет единиц энергии**

	Дж	кВт·ч	кгс·м	ккал	эВ	эрг
1 Дж	1	$2{,}78 \cdot 10^{-7}$	0,102	$2{,}39 \cdot 10^{-4}$	$6{,}24 \cdot 10^{18}$	10^7
1 кВт·ч	$3{,}60 \cdot 10^6$	1	$3{,}67 \cdot 10^5$	860,0	$2{,}25 \cdot 10^{25}$	$3{,}60 \cdot 10^{13}$
1 кгс·м	9,81	$2{,}72 \cdot 10^{-6}$	1	$2{,}34 \cdot 10^{-3}$	$6{,}12 \cdot 10^{19}$	$9{,}81 \cdot 10^7$
1 ккал	$4{,}19 \cdot 10^3$	$1{,}16 \cdot 10^{-3}$	427	1	$2{,}61 \cdot 10^{22}$	$4{,}19 \cdot 10^{10}$
1 эВ	$1{,}60 \cdot 10^{-19}$	$4{,}45 \cdot 10^{-26}$	$1{,}63 \cdot 10^{-20}$	$3{,}83 \cdot 10^{-23}$	1	$1{,}60 \cdot 10^{-12}$
1 эрг	10^{-7}	$2{,}78 \cdot 10^{-14}$	$0{,}102 \cdot 10^{-7}$	$2{,}39 \cdot 10^{-11}$	$6{,}24 \cdot 10^{11}$	1

Пример. 1 Дж=$2{,}78 \cdot 10^{-7}$ кВт·ч=0,102 кгс·м= ..

Таблица 2.5. **Пересчет единиц мощности**

	Вт	кВт	кгс·м/с	л. с.	ккал/с	эрг/с
1 Вт	1	10^{-3}	0,102	$1{,}36 \cdot 10^{-3}$	$2{,}39 \cdot 10^{-4}$	10^7
1 кгс·м/с	9,81	$9{,}81 \cdot 10^{-3}$	1	$1{,}33 \cdot 10^{-2}$	$2{,}34 \cdot 10^{-3}$	$9{,}81 \cdot 10^7$
1 л.с.	736	0,736	75	1	0,176	$7{,}36 \cdot 10^9$
1 ккал/с	$4{,}19 \cdot 10^3$	4,19	427	5,69	1	$4{,}19 \cdot 10^{10}$
1 эрг/с	10^{-7}	10^{-10}	$1{,}02 \cdot 10^{-8}$	$1{,}36 \cdot 10^{-10}$	$2{,}39 \cdot 10^{-11}$	1

Таблица 2.6. **Пересчет единиц момента инерции и махового момента**

		Момент инерции				Момент маховой	
		кг·м^2	г·см^2	кгс·м·с^2	гс·см·с^2	кгс·м^2	тс·м^2
Момент инерции (динамический) J	1 кг·м^2	1	10^7	0,102	$0{,}102 \cdot 10^5$	4	$4 \cdot 10^{-3}$
	1 г·см^2	10^{-7}	1	$0{,}102 \cdot 10^{-7}$	$0{,}102 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-10}$
	1 кгс·м·с^2	9,81	$9{,}81 \cdot 10^7$	1	10^5	4·9,81	$4 \cdot 9{,}81 \cdot 10^{-3}$
	1 гс·см·с^2	$9{,}81 \cdot 10^{-5}$	$9{,}81 \cdot 10^2$	10^{-5}	1	$4 \cdot 9{,}81 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 9{,}81 \cdot 10^{-8}$

Продолжение табл. 2.6

		Момент инерции				Момент маховой	
		кг·м²	г·см²	кгс·м·с²	гс·см·с²	кгс·м²	тс·м²
Момент маховой $GD^2=4gJ$; $g=9{,}81$ м/с²	1 кгс·м²	1/4	$10^7/_4$	0,102/4	$0{,}102\cdot10^5/_4$	1	10^{-3}
	1 тс·м²	$10^3/_4$	$10^{10}/_4$	$0{,}102\cdot10^3/_4$	$102\cdot10^8/4$	10^3	1

Метрические и неметрические единицы длины, площади, объема, массы, работы и энергии, мощности, давления, скорости, частоты вращения

Ниже приводятся единицы измерения, встречающиеся в отечественной и зарубежной литературе. Для единиц, применявшихся в СССР, использованы обозначения: *устар.* — устаревшая; до *01.01.1980 г.*; *до срока, который будет установлен.*

Измерение длины в других единицах

1 мк (микрон — *устар.*) = 1 микрометр (мкм) = $=10^{-6}$ м = 10^{-4} см
1 нм (миллимикрон — *устар.*) = 1 нанометр = $=10^{-9}$ м = 10^{-6} мм
1 Å (ангстрем — *до 01.01.1980 г.*) = 10^{-10} м = $=10^{-8}$ см (точно)
1 X (икс-единица — *до 01.01.1980 г.*) = 1,00206 × $\times10^{-13}$ м = $1{,}00206\cdot10^{-11}$ см (приблизительно)
1 ферми (*устар.*) = 10^{-15} м = 10^{-13} см
1 м. миля (морская миля, в морской навигации — *до срока, который будет установлен*) = = 1852 м (точно) — длина угловой минуты меридиана.

Измерение длины в старых русских мерах

1 линия = 2,54 мм
1 дюйм = 10 линиям = 2,54 см
1 вершок = 4,445 см
1 фут = 12 дюймам = 30,48 см
1 аршин = 16 вершкам = 28 дюймам = 71,12 см
1 сажень = 3 аршинам = 7 футам = 2,134 м
1 верста = 500 саженям = 1,067 км
1 миля = 7 верстам = 7,467 км

Измерение длины в мерах, применяемых в Великобритании и США

1 мил (Mil) = 10^{-3} дюйма = 0,0254 мм
1 линия (Line) малая = 2,12 мм
1 линия большая = 100 мил = 2,54 мм
1 дюйм (Inch) = 12 мал. линий = 10 больш. линий = 2,54 см
1 хэнд (Hand) = 4 дюймам = 10,16 см
1 фут (Foot) = 3 хэндам = 12 дюймам = 30,48 см
1 ярд (Yard) = 3 футам = 91,44 см
1 фатом (Fathom) = 2 ярдам = 6 футам = 1,83 м
1 род (Rod) = 5,5 ярда = 5,03 м
1 миля уставная (Statute mile) = 1760 ярдам = = 1,609 км
1 миля морская (Mile nautical) = 1,852 км

Измерение площади в других единицах

1 а (ар — *устар.*) = 100 м² = 10^{-2} га.
1 б (барн, в физике, *до 01.01.1980 г.*) = $=10^{-28}$ м² = 10^{-24} см² (точно)

Измерение площади в старых русских мерах

1 кв. дюйм = 6,45 см²
1 кв. аршин = 0,5058 м²
1 кв. сажень = 4,55 м²
1 десятина = 2400 кв. саженям = 1,09 га

Измерение площади в мерах, применяемых в Великобритании и США

1 кв. мил = 10^{-6} кв .дюйма = $6{,}45\cdot10^{-4}$ мм²
1 круг. мил (Circular mil) = 0,785 кв. мила = $=5{,}065\cdot10^{-4}$ мм²
1 кв. линия (Square line) малая = 4,48 мм²
1 кв. линия большая = 10^4 кв. мил = 6,45 мм²
1 кв. дюйм = 144 кв. мал. линиям = 100 кв. больш. линиям = 6,45 см²
1 кв. фут = 144 кв. дюймам = 929,03 см²
1 кв. ярд = 9 кв. футам = 8361 см²
1 кв. фатом = 4 кв. ярдам = 3,34 м²
1 акр (Acre) = 43 560 кв. футам = 4047 м²
1 кв. миля = 640 акрам = 259 га = $259\cdot10^4$ м²

Измерение объема в мерах, применяемых в Великобритании и США

1 куб. дюйм (Cubic inch) = 16,4 см³
1 куб. фут = 1728 куб. дюймам = 0,0283 м³
1 куб. ярд = 27 куб. футам = 0,765 м³
1 куб. фатом = 8 куб. ярдам = 6,12 м³

Измерение вместимости для сыпучих тел и жидкостей в Великобритании

1 пинта (Pint) = 0,568 л
1 кварта (Quart) = 2 пинтам = 1,136 л
1 галлон (Gallon) = 4 квартам = 4,546 л
1 бушель (Buchel) = 8 галлонам = 36,37 л

Измерение вместимости в США
Для сыпучих тел

1 пинта = 0,55 л
1 кварта = 1,10 л
1 галлон = 4,40 л
1 бушель = 35,24 л
1 баррель = 115,6 л

Для жидкостей

1 пинта = 0,47 л
1 кварта = 0,95 л
1 галлон = 3,78 л
1 баррель = 159 л

Измерение массы в других единицах

1 ц (центнер — *до 01.01.1980 г.*, в сельском хозяйстве) = 0,1 т = 100 кг (точно)
1 кар (карат — для драгоценных камней и жемчуга, *до срока, который будет установлен*) = 0,2 г (точно)

Измерение массы в старых русских мерах

1 доля = 44,5 мг
1 золотник = 96 долям = 4,27 г
1 лот = 3 золотникам = 12,8 г
1 фунт = 32 лотам = 409,5 г
1 пуд = 40 фунтам = 16,381 кг

Измерение массы в мерах, применяемых в Великобритании

1 гран (Grain) = 64,8 мг
1 весовое пенни (Penny weight) = 24 гранам = = 1,555 г
1 тройская унция (Troy ounce) = 20 вес. пенни = = 31,10 г
1 тройский фунт (Troy pound) = 12 тр. унциям = 373,2 г
1 унция (Ounce) = 28,35 г
1 фунт (Pound) = 16 унциям = 453,6 г
1 центнер (Centumweight) = 112 фунтам = = 50,8 кг
1 тонна короткая (Short ton) = 907,2 кг
1 тонна длинная (Long ton) = 20 центнерам = = 1016 кг

Измерение массы в мерах, применяемых в США

1 гран = 64,8 мг
1 унция = 28,35 г
1 фунт = 453,6 г
1 центнер = 100 фунтам = 45,36 кг
1 тонна = 20 центнерам = 907,2 кг
1 мильер (Millier) = 1000 кг

Измерение силы в других единицах

1 паундаль (Poundal) = 0,138 Н
1 фунт-сила (Pound—force) = 4,45 Н
1 дин (дина — *до 01.01.1980 г.*) = 10^{-5} Н
1 гс (грамм-сила или понд — *до 01.01.1980 г.*) = = $9{,}80665 \cdot 10^{-3}$ Н (точно)
1 тс (тонна-сила — *до 01.01.1980 г.*) = 9806,65 Н (точно)
1 кгс (килограмм-сила — *до 01.01.1980 г.*) = = 9,80665 Н (точно)
1 сн (стен — *устар.*) = 1000 Н

Измерение работы и энергии в других единицах

1 эрг (эрг — *до 01.01.1980 г.*) = $1 \cdot 10^{-7}$ Дж
1 у. е. (углеродная единица) = 931,16 МэВ = = $1{,}4918 \cdot 10^{-10}$ Дж
1 г ($E = mc_0^2$) = $2{,}1471 \cdot 10^{13}$ кал = $5{,}6099 \times \times 10^{26}$ МэВ = $8{,}9876 \cdot 10^{13}$ Дж
1 кал (калория международная — *до 01.01.1980 г.*) = 4,1868 Дж (точно)
1 калория термохимическая ($кал_{тх}$) = 4,1840 Дж
1 калория 15-градусная ($кал_{15}$) = 4,1855 Дж
1 фут-паундаль (Foot-poundal) = 0,0421 Дж
1 фут-фунт-сила (Foot-pound-force) = = 0,324 кал = 1,356 Дж
1 литр-атмосфера технич. (л. ат. — *устар.*) = = 98,1 Дж
1 литр-атмосфера физич. (л. атм. — *устар.*) = = 24,2 кал = 10,33 кгс·м = 101,3 Дж
1 Британская термич. единица (British thermal unit — BTU) = 252 кал = $293 \cdot 10^{-6}$ кВт·ч = = 1055 Дж
1 вольт-фарадей = $96{,}5 \cdot 10^3$ Дж
1 лошадиная сила-час (л. с. ч. — *до 01.01.1980 г.*) = $2{,}648 \cdot 10^6$ Дж
1 терм (Therm) = 10^5 BTU = 29,3 кВт·ч = $105{,}5 \times \times 10^6$ Дж

Измерение мощности в других единицах

1 BTU в час = 0,293 Вт
1 килокалория в час (*до 01.01.1980 г.*) = = 1,163 Вт (точно)
1 л. с. (лошадиная сила — *до 01.01.1980 г.*) = = 75 кгс·м/с = 735,499 Вт
1 лошадиная сила англ. = 76,04 кгс·м/с = = 745,7 Вт

Измерение давления в других единицах

1 кгс/см² (*до 01.01.1980 г.*) = 98066,5 Па (точно)
1 фунт-сила на кв. фут (*устар.*) = 47,88 Па
1 пьеза (*устар.*) = 1000 Па
1 ат (атмосфера технич. — *устар.*) = 1 кгс/см² = = $9{,}80665 \cdot 10^4$ Па
1 атм (атмосфера физич. — *устар.*) = $10{,}1325 \times \times 10^4$ Па
1 бар (бар — *до срока, который будет установлен*) = 1,02 ат = 10^5 Па
1 мм рт. ст. (миллиметр ртутного столба — *до 01.01.1980 г.*) = 13,595 кгс/м² = 133,322 Па
1 мм вод. ст. (миллиметр водяного столба — *до 01.01.1980 г.*) = 1 кгс/м² = 9,80665 Па (точно)
1 дюйм ртутного столба (*устар.*) = 3386,4 Па
1 паундаль на кв. фут (*устар.*) = 1,49 Па
1 фут водяного столба (*устар.*) = $2{,}99 \cdot 10^3$ Па

Измерение скорости в других единицах

1 км/ч = 0,278 м/с
1 уз (узел — в морской навигации — *до срока, который будет установлен*) = 1 морская миля в час = 1,852 км/ч = 0,514 м/с
1 фут в секунду (*устар.*) = 0,305 м/с

Измерение ускорения в других единицах

1 фут в секунду за секунду (*устар.*) = = 0,305 м/с²

Измерение частоты вращения

1°/с (угловой градус в секунду) = $1{,}745 \times \times 10^{-2}$ рад/с

Децибел и непер

Для характеристики изменения какой-либо величины, если величина изменяется на несколько порядков, применяется десятичный или натуральный логарифм отношения двух значений этой величины. Например, в электротехнике постоянная ослабления четырехполюсника, фильтра, линии при согласованной нагрузке

$$A = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ дБ}; \quad A = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} \text{ Нп},$$

где P_1 и P_2 — мощности на входе и выходе, или

$$A = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} \text{ дБ}; \quad A = \ln \frac{U_1}{U_2} \text{ Нп},$$

где U_1 и U_2 — напряжения на входе и выходе.

В обоих случаях полученная величина A безразмерная, но в первом случае указывается, что A измерена в децибелах (дБ), а во втором — в неперах (Нп). Разность уровней двух мощностей равна 1 дБ, если десятичный логарифм их отношений равен 0,1; разность уровней двух мощностей равна 1 Нп, если натуральный логарифм их отношения равен 2. 1 дБ = 0,115 Нп; 1 Нп = 8,686 дБ.

2.3. ЕДИНИЦЫ ТЕПЛОВЫХ, АКУСТИЧЕСКИХ И СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН, ВЕЛИЧИН ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОАКТИВНОСТЬ

Единицы тепловых величин в Международной системе

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единиц неметрической системы	Единица в неметрической системе, основанной на калории		
			русское	международное		Наименование	Обозначение	Содержит единиц системы Си
Температура, разность температур	кельвин	К	К	K	1	—	—	—
Количество теплоты, термодинамический потенциал, энтальпия	джоуль	кг·м²/с²	Дж	J	0,239	калория (межд.)	кал	4,1868 (точно)
Теплоемкость системы, энтропия	джоуль на кельвин	кг·м²/(с²·К)	Дж/К	J/K	$0{,}239 \cdot 10^{-3}$	килокалория на кельвин	ккал/К	$4{,}1868 \cdot 10^{3}$
Удельная теплоемкость, удельная энтропия	джоуль на килограмм-кельвин	м²/(с²·К)	Дж/(кг·К)	J/(kg·K)	$0{,}239 \cdot 10^{-3}$	килокалория на килограмм-кельвин	ккал/(кг·К)	$4{,}1868 \cdot 10^{3}$
Удельное количество теплоты, удельный термодинамический потенциал	джоуль на килограмм	м²/с²	Дж/кг	J/kg	$0{,}239 \cdot 10^{-3}$	килокалория на килограмм	ккал/кг	$4{,}1868 \cdot 10^{3}$
Температурный градиент	кельвин на метр	К/м	К/м	K/m	1	—	—	1
Тепловой поток	ватт	кг·м²/с³	Вт	W	0,860	килокалория в час	ккал/ч	1,163
Поверхностная плотность теплового потока	ватт на кв. метр	кг/с³	Вт/м²	W/m²	0,860	килокалория в час на кв. метр	ккал/(м²·ч)	1,163
Теплопроводность	ватт на метр-кельвин	кг·м/(с³·К)	Вт/(м·К)	W/(m·K)	0,860	килокалория в час на метр-кельвин	ккал/(ч·м·К)	1,163
Коэффициент теплопередачи, теплообмена	ватт на кв. метр-кельвин	кг/(с³·К)	Вт/(м²·К)	W/(m²·K)	0,860	килокалория на кв. метр, час и кельвин	ккал/(м²·ч·К)	1,163
Температуропроводность	кв. метр в секунду	м²/с	м²/с	m²/s	1	—	—	1
Температурный коэффициент	кельвин в минус первой степени	$К^{-1}$	$К^{-1}$	K^{-1}	1	—	—	1

1 термия = 10^6 кал, 1 фригория = —1 ккал.

Примечания: 1. Так как разность температур может выражаться не только в кельвинах, но и в градусах Цельсия, то во всех наименованиях и обозначениях можно осуществить соответствующую замену без изменения коэффициента пересчета.

2. Сравнение температурных шкал. t °C = 0,555 (t °F — 32); t °C = T — 273,15, где t °C — температура в градусах по шкале Цельсия; t °F — температура в градусах по шкале Фаренгейта; T — температура в кельвинах (единицах термодинамической температуры).

Единицы акустических величин в Международной системе

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единиц системы	
			русское	международное	СГС (гауссовой)	МКГСС (технической)
Звуковое давление	паскаль	кг/(м·с²)= =Н/м²	Па	Pa	10 дин/см²	0,102 кгс/м²
Акустическое сопротивление	паскаль-секунда на метр в кубе	кг/(м⁴·с)	Па× ×с/м³	Pa·s/m³	10^{-5} г/(см⁴·с)	0,102 кгс·с/м⁵
Удельное акустическое сопротивление	паскаль-секунда на метр	кг/(м²·с)	Па·с/м	Pa·s/m	0,1 г/(см²·с)	0,102 кгс·с/м³
Механическое сопротивление	ньютон-секунда на метр	кг/с	Н·с/м	N·s/m	10^3 г/с	0,102 кгс·с/м
Звуковая энергия	джоуль	кг·м²/с²	Дж	J	10^7 эрг	0,102 кгс·м
Поток звуковой энергии (звуковая мощность)	ватт	кг·м²/с³= =Дж/с	Вт	W	10^7 эрг/с	0,102 кгс·м/с
Интенсивность звука	ватт на метр в квадрате	кг/с³	Вт/м²	W/m²	10^3 эрг/(см²·с)	0,102 кгс/(м·с)
Плотность звуковой энергии	джоуль на метр в кубе	кг/(м·с²)	Дж/м³	J/m³	10 эрг/см³	0,102 кгс/м²

Примечание. При записи уровней звукового давления, звуковой мощности и интенсивности звука в децибелах (дБ) применяются соответственно следующие исходные значения: $2\cdot10^{-5}$ Па; 10^{-12} Вт и 10^{-12} Вт/м².

Единицы световых величин в Международной системе

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы	
			русское	международное
Сила света	кандела	кд	кд	cd
Световой поток	люмен	кд·ср	лм	lm
Световая энергия	люмен-секунда	кд·ср·с	лм·с	lm·s
Освещенность	люкс	кд·ср/м²	лк	lx
Светимость	люмен на кв. метр	кд·ср/м²	лм/м²	lm/m²
Яркость	кандела на кв. метр	кд/м²	кд/м²	cd/m²
Световая экспозиция	люкс-секунда	кд·ср·с/м²	лк·с	lx·s
Энергия излучения	джоуль	кг·м²/с²	Дж	J
Поток излучения, мощность излучения	ватт	кг·м²/с³	Вт	W

Продолжение табл.

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы	
			русское	международное
Световой эквивалент потока излучения	люмен на ватт	$\frac{кд \cdot ср \cdot с^3}{кг \cdot м^2}$	лм/Вт	lm/W
Поверхностная плотность потока излучения	ватт на кв. метр	$кг/с^3$	$Вт/м^2$	W/m^2
Энергетическая сила света (сила излучения)	ватт на стерадиан	$кг \cdot м^2/(с^3 \cdot ср)$	Вт/ср	W/sr
Энергетическая яркость (лучистость)	ватт на стерадиан и кв. метр	$кг/(с^3 \cdot ср)$	$Вт/(ср \cdot м^2)$	$W/(sr \cdot m^2)$
Энергетическая освещенность (облученность)	ватт на кв. метр	$кг/с^3$	$Вт/м^2$	W/m^2
Энергетическая светимость (излучательность)	ватт на кв. метр	$кг/с^3$	$Вт/м^2$	W/m^2

Единицы величин, характеризующих ионизирующие излучения и радиоактивность в Международной системе

Наименование величины	Наименование единицы СИ	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единиц других систем*
			русское	международное	
Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность радионуклида)	беккерель	$с^{-1}$	Бк	Bq	$2{,}703 \cdot 10^{-11}$ Ки (кюри)
Интенсивность излучения	ватт на кв. метр	$кг/с^3$	$Вт/м^2$	W/m^2	10^3 эрг/(с·см²)
Поглощенная доза излучения, керма	грэй	Дж/кг ($м^2/с^2$)	Гр	Gy	100 рад=10^4 эрг/г
Мощность поглощенной дозы излучения, мощность кермы	грэй в секунду	Дж/(кг·с) ($м^2/с^3$)	Гр/с	Gy/s	100 рад/с
Эквивалентная доза излучения	зиверт**	$м^2/с^2$	Зв	Sv	100 бэр
Экспозиционная доза (рентгеновского и гамма-излучений)	кулон на килограмм	А·с/кг	Кл/кг	C/kg	$3{,}876 \cdot 10^3$ Р (рентген)
Мощность экспозиционной дозы	кулон на килограмм в секунду	А/кг	Кл/(кг·с)	C/(kg·s)	$3{,}876 \cdot 10^3$ Р/с

* Допускались к применению до 01.01.1980 г. следующие единицы:
1 кюри (Ки)=$3{,}70 \cdot 10^{10}$ Бк (точно);
1 рентген (Р)=$2{,}58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг (точно);
1 рад=10^{-2} Гр (Дж/кг)=100 эрг/г;
1 бэр=0,01 Зв.

** Зиверт равен одному грэю на коэффициент качества (1 Гр/K). Безразмерный коэффициент качества K определяет зависимость неблагоприятных биологических последствий облучения человека в малых дозах от линейной передачи энергии, т. е. регламентированные значения относительной биологической эффективности излучения [2.6].

2.4. ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Единицы Международной системы

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единиц системы		
			русское	международное	СГС-симметричная	СГСМ	СГСЭ
		Электрические					
Сила электрического тока	ампер	А	А	A	$3\cdot10^9$	0,1	$3\cdot10^9$ Совпадает с системой СГС
Количество электричества, заряд	кулон	А·с	Кл	C	$3\cdot10^9$	0,1	
Электрический потенциал, напряжение, ЭДС	вольт	кг·м²/(А·с³)	В	V	1/300	10^8	
Напряженность электрического поля	вольт на метр	кг·м/(А·с³)	В/м	V/m	$10^{-4}/3$	10^6	
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	фарад на метр	$А^2\cdot с^4/(кг\cdot м^3)$	Ф/м	F/m	—	—	
Электрический момент диполя	кулон-метр	А·с·м=Кл·м	Кл·м	C·m	$3\cdot10^{11}$	10	
Электрическое смещение (индукция)	кулон на кв. метр	$А\cdot с/м^2$=Кл/м²	Кл/м²	C/m²	$4\pi\cdot3\cdot10^5$	$4\pi\cdot10^{-5}$	
Поляризованность	кулон на кв. метр	$А\cdot с/м^2$=Кл/м²	Кл/м²	C/m²	$3\cdot10^5$	10^{-5}	
Электрическая емкость	фарад	$А^2с^4/(кг\cdot м^2)$=с/Ом	Ф	F	$9\cdot10^{11}$ см	10^{-9}	
Плотность тока	ампер на кв. метр	А/м²	А/м²	A/m²	$3\cdot10^5$	10^{-5}	
Электрическое сопротивление	ом	$кг\cdot м^2/(А^2\cdot с^3)$=В/А	Ом	Ω	$10^{-11}/9$	10^9	
Электрическая проводимость	сименс	$А^2\cdot с^3/(кг\cdot м^2)$=1/Ом	См	S	$9\cdot10^{11}$	10^{-9}	
Удельное электрическое сопротивление*	ом-метр	$кг\cdot м^3/(А^2\cdot с^3)$=Ом·м	Ом·м	Ω·m	$10^{-9}/9$	10^{11}	
Удельная электрическая проводимость**	сименс на метр	$А^2\cdot с^3/кг\cdot м^3$=1/(Ом·м)	См/м	S/m	$9\cdot10^9$	10^{-11}	
Подвижность носителей заряда	метр в секунду, деленный на вольт на метр	$А\cdot с^2/кг$=м²/(В·с)	$\frac{м/с}{В/м}$	$\frac{m/s}{V/m}$	$3\cdot10^5$	10^{-4}	
Полная мощность	вольт-ампер	$кг\cdot м^2/с^3$	В·А	V·A	10^7	10^7	
Реактивная мощность	вар	$кг\cdot м^2/с^3$	вар	var	10^7	10^7	

Продолжение табл.

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единиц системы		
			русское	международное	СГС-симметричная	СГСМ	СГСЭ
		Магнитные					
Магнитный поток	вебер	кг·м²/(А·с²)=В·с	Вб	Wb	10^8 Мкс (максвелл)		1/300
Магнитная индукция	тесла	кг/(А·с²)=В·с/м²	Тл	T	10^4 Гс (гаусс)		$10^{-6}/3$
Абсолютная магнитная проницаемость	генри на метр	кг·м/(А²·с²)	Гн/м	H/m	—		—
Магнитный момент электрического тока, магнитный момент диполя	ампер-кв. метр	А·м²	А·м²	A·m²	10^3	Совпадает с системой СГС	$3\cdot10^{13}$
Намагниченность	ампер на метр	А/м	А/м	A/m	10^{-3} (гаусс или эрстед)		$3\cdot10^7$
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м	А/м	A/m	$4\pi\cdot10^{-3}$ Э (эрстед)		$4\pi\cdot3\cdot10^7$
Индуктивность, взаимная индуктивность	генри	кг·м²/(А²·с²)=В·с/А=Вб/А=Ом·с	Гн	H	10^9 см		$10^{-11}/9$
Магнитодвижущая сила, разность скалярных магнитных потенциалов	ампер	А	А	A	$0{,}4\pi$ Гб(гильберт)		$4\pi\cdot3\cdot10^9$
Магнитное сопротивление	ампер на вебер	с²·А²/(м²·кг)=А/Вб=1/Гн	А/Вб	A/Wb	$4\pi\cdot10^{-9}$		$4\pi\cdot9\cdot10^{11}$
Магнитная проводимость	вебер на ампер	м²·кг/(с²·А²)=Гн	Вб/А	Wb/A	$10^9/4\pi$		$10^{-11}/(4\pi\cdot9)$
Векторный магнитный потенциал	вебер на метр	кг·м/(А·с²)=В·с/м	Вб/м	Wb/m	10^8		$10^{-4}/3$

* 1 Ом·см=10^{-2} Ом·м; 1 Ом·мм²/м=10^{-6} Ом·м=1 мкОм·м.

** 1 $Ом^{-1}\cdot см^{-1}$=100 См/м; 1 м/Ом·мм²=10^6 См/м=1 МСм/м.

Единицы электрических и магнитных величин, допускавшиеся наравне с единицами СИ до 01. 01. 1980 г.

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		русское	международное	
Удельное электрическое сопротивление	ом-квадратный миллиметр на метр	Ом·мм²/м	Ω·mm²/m	10^{-6} Ом·м
Магнитный поток	максвелл	Мкс	Mx	10^{-8} Вб
Магнитная индукция	гаусс	Гс	Gs	10^{-4} Тл
Магнитодвижущая сила, разность скалярных магнитных потенциалов	гильберт	Гб	Gb	$(10/4\pi)$ А
Напряженность магнитного поля	эрстед	Э	Oe	$(10^3/4\pi)$ А/м
Энергия	эрг	эрг	erg	$1\cdot10^{-7}$ Дж

2.5. МНОЖИТЕЛИ И ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ И ИХ НАИМЕНОВАНИЯ

Наименование приставки	Обозначение приставки		Множитель (отношение к главной единице)	Наименование приставки	Обозначение приставки		Множитель (отношение к главной единице)
	русское	международное			русское	международное	
экса	Э	E	10^{18}	деци	д	d	10^{-1}
пета	П	P	10^{15}	санти	с	c	10^{-2}
тера	Т	T	10^{12}	милли	м	m	10^{-3}
гига	Г	G	10^{9}	микро	мк	μ	10^{-6}
мега	М	M	10^{6}	нано	н	n	10^{-9}
кило	к	k	10^{3}	пико	п	p	10^{-12}
гекто	г	h	10^{2}	фемто	ф	f	10^{-15}
дека	да	da	10^{1}	атто	а	a	10^{-18}

Примеры. 1 килоом=1 кОм=1000 Ом=10^3 Ом; 1 миллиампер=1 мА=10^{-3} А; 1 микрофарад=1 мкф=10^{-6} Ф.

Примечания: 1. Присоединение к наименованию единицы двух и более приставок подряд не допускается. Например, вместо наименования единицы «микромикрофарад» следует писать наименование «пикофарад».

2. Кратные и дольные единицы в принципе следует выбирать таким образом, чтобы числовые значения величины находились в интервале от 0,1 до 1000.

2.6. ВАЖНЕЙШИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ (ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОНСТАНТЫ)

Магнитная постоянная

$$\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}\ \text{Гн/м} = 4\pi\cdot10^{-9}\ \text{Гн/см}.$$

Электрическая постоянная

$$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c_0^2 = 8{,}85418782\cdot10^{-12}\ \text{Ф/м} \approx$$

$$\approx \frac{1}{4\pi\cdot9\cdot10^9}\ \text{Ф/м} = \frac{1}{4\pi\cdot9\cdot10^{11}}\ \text{Ф/см},$$

где c_0=2,99792458·10^8 м/с — скорость света в вакууме.

Волновое сопротивление вакуума

$$\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} = 376{,}7\ \text{Ом}.$$

Гравитационная постоянная

$$G = 6{,}6720\cdot10^{-11}\ \text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с}^2) =$$
$$= 6{,}6720\cdot10^{-11}\ \text{Н}\cdot\text{м}^2/\text{кг}^2 =$$
$$= 6{,}6720\cdot10^{-8}\ \text{дин}\cdot\text{см}^2/\text{г}^2.$$

Нормальное ускорение

$$g_n = 9{,}80665\ \text{м}\cdot\text{с}^{-2}.$$

Элементарный заряд (заряд электрона)

$$e = 1{,}6021892\cdot10^{-19}\ \text{Кл} \approx$$
$$\approx 4{,}806\cdot10^{-10}\ \text{ед. СГСЭ}.$$

Масса покоя электрона

$$m_e = 9{,}109534\cdot10^{-31}\ \text{кг} = 9{,}109534\cdot10^{-28}\ \text{г} =$$
$$= 5{,}4858022\cdot10^{-4}\ \text{а. е. м.}$$

Отношение заряда электрона к его массе

$$e/m_e = 1{,}7588047\cdot10^{11}\ \text{Кл/кг} =$$
$$= 1{,}7588047\cdot10^{8}\ \text{Кл/г}.$$

Масса покоя протона

$$m_p = 1{,}6726485\cdot10^{-27}\ \text{кг} = 1{,}6726485\cdot10^{-24}\ \text{г} =$$
$$= 1{,}0072765\ \text{а. е. м.}$$

Масса покоя нейтрона

$$m_n = 1{,}6749543\cdot10^{-27}\ \text{кг} = 1{,}6749543\cdot10^{-24}\ \text{г} =$$
$$= 1{,}0086650\ \text{а. е. м.}$$

2.8. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	1 H 1,00794 водород						(H)	2 4,00260 He гелий		
2	3 Li 6,94$_1$ литий	4 Be 9,01218 бериллий	5 10,81 B бор	6 12,011 C углерод	7 14,0067 N азот	8 15,999$_4$ O кислород	9 18,998403 F фтор	10 20,17$_9$ Ne неон		
3	11 Na 22,98977 натрий	12 Mg 24,305 магний	13 26,98154 Al алюминий	14 28,085$_5$ Si кремний	15 30,97376 P фосфор	16 32,06 S сера	17 35,453 Cl хлор	18 39,94$_8$ Ar аргон		
4	19 K 39,098$_3$ калий	20 Ca 40,08 кальций	21 Sc 44,9559 скандий	22 Ti 47,90 титан	23 V 50,9415 ванадий	24 Cr 51,996 хром	25 Mn 54,9380 марганец	26 Fe 55,84$_7$ железо	27 Co 58,9332 кобальт	28 Ni 58,70 никель
	29 63,54$_6$ Cu медь	30 65,38 Zn цинк	31 69,72 Ga галлий	32 72,5$_9$ Ge германий	33 74,9216 As мышьяк	34 78,9$_6$ Se селен	35 79,904 Br бром	36 83,80 Kr криптон		
5	37 Rb 85,467$_8$ рубидий	38 Sr 87,62 стронций	39 Y 88,9059 иттрий	40 Zr 91,22 цирконий	41 Nb 92,9064 ниобий	42 Mo 95,94 молибден	43 Tc 98,9062 технеций	44 Ru 101,0$_7$ рутений	45 Rh 104,9055 родий	46 Pl 106,4 палладий
	47 107,8682 Ag серебро	48 112,41 Cd кадмий	49 114,82 In индий	50 118,6$_9$ Sn олово	51 121,7$_5$ Sb сурьма	52 127,6$_0$ Te теллур	53 126,9045 I йод	54 131,30 Xe ксенон		
6	55 Cs 132,9054 цезий	56 Ba 137,33 барий	57* La 138,905$_5$ лантан	72 Hf 178,4$_9$ гафний	73 Ta 180,947$_9$ тантал	74 W 183,8$_5$ вольфрам	75 Re 186,207 рений	76 Os 190,2 осмий	77 Ir 192,2$_2$ иридий	78 Pt 195,0$_9$ платина
	79 196,9665 Au золото	80 200,5$_9$ Hg ртуть	81 204,3$_7$ Tl таллий	82 207,2 Pb свинец	83 208,9804 Bi висмут	84 [209] Po полоний	85 [210] At астат	86 [222] Rn радон		
7	87 Fr [223] франций	88 Ra 226,0254 радий	89** Ac [227] актиний	104 Ku [261] курчатовий	105 (Ns) (нильсборий)	В квадратных скобках приведены массовые числа наиболее устойчивых изотопов. В круглых — необщепринятые символы и названия				

*Лантаноиды

58 Ce 140,12 церий	59 Pr 140,9077 празеодим	60 Nd 144,2$_4$ неодим	61 Pm [145] прометий	62 Sm 150,4 самарий	63 Eu 151,96 европий	64 Gd 157,2$_5$ гадолиний
65 Tb 158,9254 тербий	66 Dy 162,5$_5$ диспрозий	67 Ho 164,9304 гольмий	68 Er 167,2$_6$ эрбий	69 Tm 168,9342 тулий	70 Yb 173,0$_4$ иттербий	71 Lu 174,967 лютеций

**Актиноиды

90 Th 232,0381 торий	91 Pa 231,0359 протактиний	92 U 238,02$_9$ уран	93 Np 237,0482 нептуний	94 Pu [244] плутоний	95 Am [243] америций	96 Cm [247] кюрий
97 Bk [247] берклий	98 Cf [251] калифорний	99 Es [254] эйнштейний	100 Fm [257] фермий	101 Md [258] менделевий	102 (No) [255] (нобелий)	103 (Lr) [256] лоуренсий

Масса атома водорода

$1{,}6735595 \cdot 10^{-24}$ г $= 1{,}0078250$ а. е. м.

Отношение масс протона и электрона

$$m_p/m_e = 1836{,}15152.$$

Магнетон Бора

$$eh/4\pi m_e = \mu_B = 9{,}274078 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл} =$$
$$= 0{,}9274078 \cdot 10^{-20} \text{ эрг/Гс}.$$

Масса покоя мюона

$m_\mu = 1{,}883566 \cdot 10^{-28}$ кг $= 0{,}1134292$ а. е. м.

Отношение массы мюона к массе электрона

$$m_\mu/m_e = 206{,}76865.$$

Ядерный магнетон

$$\mu_N = eh/4\pi m_p = 5{,}050824 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}.$$

Магнитный момент электрона

$$\mu_e = 9{,}284832 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}.$$

Магнитный момент протона

$$\mu_p = 1{,}4106171 \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл}.$$

Магнитный момент мюона

$$\mu_\mu = 4{,}490474 \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл}.$$

Отношение магнитного момента электрона к магнитному моменту протона

$$\mu_e/\mu_p = 658{,}21068.$$

Отношение магнитного момента мюона к магнитному моменту протона

$$\mu_\mu/\mu_p = 3{,}1833402.$$

Первая постоянная излучения

$$c_1 = 2\pi hc_0^2 = 3{,}741832 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2.$$

Вторая постоянная излучения

$$c_2 = hc_0/k = 0{,}01438786 \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Постоянная Планка

$$h = 6{,}626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} =$$
$$= 6{,}626176 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} = \hbar \cdot 2\pi.$$

Постоянная Больцмана

$$k = R/N_A = 1{,}380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} =$$
$$= 1{,}38662 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/К}.$$

Постоянная Стефана—Больцмана

$$\sigma = 5{,}67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4) =$$
$$= 5{,}67032 \cdot 10^{-5} \text{ эрг/(см}^2 \cdot \text{К}^4 \cdot \text{с}).$$

Постоянная Вина

$$b = 2{,}898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} = 0{,}2898 \text{ см} \cdot \text{К}.$$

Универсальная газовая постоянная

$$R = pV/T = 8{,}31441 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)},$$

где давление p — в Па, нормальный объем V — в м^3;

$$R = 8{,}31441 \cdot 10^7 \text{ эрг/(К} \cdot \text{моль)},$$

где p — в дин/см^2; V — в см^3;

$$R = 62\,360 \text{ мм рт. ст. см}^3/(\text{К} \cdot \text{моль}),$$

где p — в мм. рт. ст.; V — в см^3.

Температурный коэффициент объемного расширения идеальных газов

$$\alpha = 0{,}00366 \text{ К}^{-1}.$$

Число (постоянная) Авогадро

$$N_A = 6{,}022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Число Лошмидта

$$N_L = 2{,}687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Число (постоянная) Фарадея

$$F = N_A e = 96\,484{,}56 \text{ Кл/моль}.$$

2.8. БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

В качестве буквенных обозначений величин должны применяться буквы латинского и греческого алфавитов при необходимости с нижними и (или) верхними индексами.

Для изменяющихся во времени электрических величин — ЭДС, напряжения, заряда, тока, плотности тока следует применять обозначения: a — мгновенное значение; A — действующее значение (для периодически изменяющихся величин); A_m — амплитуда (для гармонически изменяющихся величин). Здесь под a, A, A_m понимается любая из перечисленных выше изменяющихся величин.

Операторные величины следует обозначать по типу: $I(p)$ или $I(s)$ — операторный ток.

Комплексные величины следует обозначать по типу:

$$\underline{A} = A' + jA'' = \operatorname{Re}\underline{A} + j \operatorname{Im}\underline{A} =$$
$$= Ae^{j\alpha} = |\underline{A}|\, e^{j\alpha} = A \angle \alpha = |\underline{A}| \angle \alpha,$$

где $\underline{A}$ — любая из комплексных величин; $A' = \operatorname{Re}\underline{A}$ — ее действительная часть; $\underline{A}'' = \operatorname{Im}\underline{A}$ — ее мнимая часть; $A = |\underline{A}|$ — модуль и α — аргумент комплексной величины.

Сопряженная комплексная величина

$$\underline{A}^* = A' - jA'' = \operatorname{Re}\underline{A} - j \operatorname{Im}\underline{A} = Ae^{-j\alpha} =$$
$$= |\underline{A}|\, e^{-j\alpha} = A \angle -\alpha = |\underline{A}| \angle -\alpha.$$

Для комплексной величины, каждая из составляющих которой имеет собственное буквенное обозначение, следует применять обозначения типа:

$$\underline{Z} = \operatorname{Re}\underline{Z} + j \operatorname{Im}\underline{Z} = r + jx,$$

где $\underline{Z}$ — комплексное сопротивление; r — активное и x — реактивное сопротивления.

Допускается модули комплексных величин, не являющихся изображениями функций времени, обозначать строчными буквами.

Для основных электрических и магнитных величин должны применяться следующие обозначения:

Латинский алфавит

A — плотность тока линейная; потенциал магнитный векторный
B — индукция магнитная
B, b — проводимость реактивная
C — емкость
c — скорость распространения электромагнитных волн (c_0 — в вакууме)
D — смещение электрическое
E — напряженность электрического поля
E, e — электродвижущая сила (ЭДС)
F — магнитодвижущая сила (МДС)
f — частота колебаний (f_0 — резонансная)
G, g — проводимость активная
H — напряженность магнитного поля, передаточная функция
I, i — ток
J — плотность тока
k — коэффициент связи
L — индуктивность собственная
M — индуктивность взаимная; намагниченность
m — магнитный момент; число фаз многофазной системы цепей
N — коэффициент размагничивания
n — коэффициент трансформации; отношение чисел витков
P — мощность; активная мощность; поляризованность
p — момент электрический; мощность удельная; число пар полюсов
Q — добротность; мощность реактивная
Q, q — заряд
R, r — сопротивление электрическое; сопротивление активное
S — мощность полная
T — период колебаний
U, u — напряжение
W — энергия электромагнитная
w — число витков; энергия электромагнитная удельная
X, x — сопротивление реактивное
Y, y — проводимость полная
Z, z — сопротивление полное

Греческий алфавит

A — постоянная ослабления
α — коэффициент ослабления (Нп/м)
B — постоянная фазы
β — коэффициент фазы (рад/м)
Γ — постоянная передачи
γ — коэффициент распространения; проводимость удельная электрическая
δ — коэффициент затухания ($с^{-1}$); угол потерь
ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость
ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость
ε_0 — электрическая постоянная
θ — декремент колебаний логарифмический
$\varkappa$ — восприимчивость магнитная
λ — длина электромагнитной волны; коэффициент мощности
μ_a — абсолютная магнитная проницаемость
μ_r — относительная магнитная проницаемость
μ_0 — магнитная постоянная
Π — вектор Пойнтинга
ρ — коэффициент отражения; плотность электрического заряда объемная; сопротивление электрическое удельное
σ — плотность электрического заряда поверхностная; проводимость электрическая удельная
τ — плотность электрического заряда линейная; постоянная времени
Φ — магнитный поток
φ — потенциал электрический; сдвиг фаз между напряжением и током
χ — восприимчивость диэлектрическая
Ψ — потокосцепление
Ω, ω — частота колебаний угловая

Примеры применения индексов

$Z_в$ — волновое сопротивление
$r_{вт}$ — внутреннее сопротивление
Z_c — характеристическое сопротивление
$u_{вх}$ — входное напряжение
$u_{вых}$ — выходное напряжение
$C_{дин}$ — емкость динамическая
$z_{диф}$ — индуктивность дифференциальная
$r_к$ — сопротивление короткого замыкания
$W_м$ — энергия магнитная
I_m — амплитудное значение тока
I_{max} — максимальное значение тока
I_{min} — минимальное значение тока
I_Σ — суммарный ток
$U_ф$ — фазное напряжение
$r_х$ — сопротивление холостого хода
$a_* = a/a_0$ — отнесенная к базисному значению (a_0) величина

Список литературы

2.1. **Единицы** физических величин. ГОСТ 8.417-81 (СТ СЭВ 1052-78) (см. также РД 50-160-79. Методические указания. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052-78).

2.2. **ГСССД 1-76.** Фундаментальные физические константы.

2.3. **ГОСТ 1494-77.** (СТ СЭВ 3231-81). Электротехника. Буквенные обозначения основных величин.

2.4. **Бурдун Г. Д.** Справочник по Международной системе единиц. М.: Изд-во стандартов, 1980. 232 с.

2.5. **Глебов Г. Д.** Единицы физических величин в электронике. М.: Высшая школа, 1983. 87 с.

2.6. **Машкович В. П.** Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982. 296 с.

2.7. **Олейникова Л. Д.** Единицы физических величин в энергетике (Точность воспроизведения и передачи): Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1983. 232 с.

2.8. **Периодическая** система элементов Д. И. Менделеева. — В кн.: Химический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983, с. 432—434.

2.9. **Сена Л. А.** Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1977. 335 с.

2.10. **Чертов А. Г.** Единицы физических величин. М.: Высшая школа, 1977. 287 с.

2.11. **Стоцкий Л. Р.** Физические величины и их единицы. Справочник. М.: Просвещение, 1984. 239 с.

Раздел 3

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРОФИЗИКЕ

СОДЕРЖАНИЕ

3.1. Электромагнитные явления в проводниках и полупроводниках 39
Зонная теория (39). Собственная и примесная электропроводности полупроводников (41). Контактные явления на границе полупроводника с металлом (42). Электронно-дырочный переход (43). Термоэлектрические и термомагнитные явления (44). Гальваномагнитные явления (46). Магнитооптические явления (47). Внутренний фотоэффект (48). Люминесценция (48)
3.2. Электромагнитные явления в ферромагнетиках 49
Процессы намагничивания (49). Вихревые токи при перемагничивании и магнитная вязкость (50)
3.3. Сверхпроводимость 51
Основные сведения (51). Электромагнитные свойства сверхпроводников (52). Слабосвязанные сверхпроводники (54)
3.4. Электромагнитные явления в проводящей движущейся среде 55
Уравнения магнитогидродинамики (55). «Вмороженность» и «диффузия» магнитного поля (55). Магнитное давление, электромагнитные насосы и ускорители (56)
3.5. Электронная эмиссия 57
Термоэлектронная эмиссия (57). Автоэлектронная эмиссия (58). Фотоэлектронная эмиссия (58). Вторичная электронная эмиссия (59). Вторичная эмиссия под действием положительных ионов, метастабильных атомов и излучения разряда (59).
3.6. Движение электронов и ионов в вакууме и газах 59
Электрический ток в вакууме (59). Столкновение электронов и ионов с атомами и молекулам газа (59). Движение электронов и ионов в газе (61)
3.7. Виды электрического разряда в газах . 62
Темный разряд и развитие самостоятельного разряда (62). Тлеющий разряд (63). Дуговой разряд (63). Коронный и искровой разряды (64). Газовая плазма (65)
3.8. Электрические процессы в диэлектриках
Поляризация диэлектриков (66). Электропроводность диэлектриков (68). Пробой диэлектриков (70)
3.9. Основы квантовой электроники . . . 72
Список литературы 74

3.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОВОДНИКАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ[1]

Зонная теория

Анализ электромагнитных явлений в твердых телах базируется на зонной теории. Согласно квантовой теории энергия электронов в изолированном атоме имеет дискретные значения. В качестве примера на рис. 3.1 изображена диаграмма возможных значений энергии свободного атома натрия. Расстояние между уровнями уменьшается при увеличении энергии. Согласно принципу Паули на одном и том же энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, имеющих противоположные спины. Заполненные уровни образуют электронные оболочки атома, которые обычно обозначаются цифрами 1, 2, 3 ..., определяющими главное квантовое число. Начиная со второй, оболочки разбиваются на подоболочки: 2s, 2p, 3s, 3p, 3d...

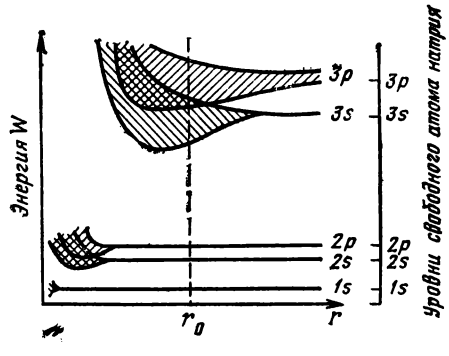


Рис. 3.1. Энергетические уровни атомов натрия

При взаимодействии большого числа атомов, образующих кристалл, энергетические уровни электронов изменяются. Эти изменения тем больше, чем дальше от ядра находится электрон. Наибольшие изменения касаются энергии внешних валентных электронов. Это объясняется тем, что при объединении N одинаковых атомов, образующих твердое тело, каждый уровень энергии изолированного атома расщепляется на N близко расположенных друг к другу уровней, которые образуют зону определенной ширины. Расстояние между уровнями в зоне зависит от концентрации атомов. Так, при концентрации около 10^{28} м$^{-3}$ и при ширине зоны, равной 1 эВ, уровни располагаются друг от друга на расстоянии 10^{-28} эВ.

Измерение уровней и образование энергетических зон для атомов натрия при их сближении показаны на рис. 3.1. Картина расщепления энергетических уровней атома в зоне соответствует периоду кристаллической решетки r_0. Таким образом, в твердом теле вместо системы отдельных уровней энергии, свойственных изолированному атому, появляется система энергетических зон, каждая из которых происходит из соответствующего уровня электронов атома и состоит из близко расположенных уровней. Зоны разрешенных уровней энергий отделены друг от друга некоторым интервалом энергий, который называется запрещенной зоной (рис. 3.2). Ширина запрещенной зоны ΔW_3 определяет многие электрические свойства твердого тела. В основе классификации электротехнических материалов лежит

[1] Подпараграфы «Термоэлектрические и термомагнитные явления», «Гальваномагнитные явления», «Магнитооптические явления», «Внутренний фотоэффект» и «Люминесценция» написаны проф. Е. С. Кухаркиным.

структура зон твердого тела при нулевой температуре (рис. 3.3). У проводников зона проводимости и валентная зона перекрываются (рис. 3.3, *а*) и даже при нулевой температуре значительное количество электронов находится в зоне проводимости, что обусловливает электропроводность проводников.

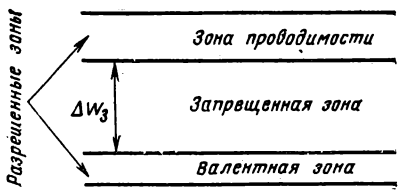


Рис. 3.2. Структура энергетических зон твердого тела

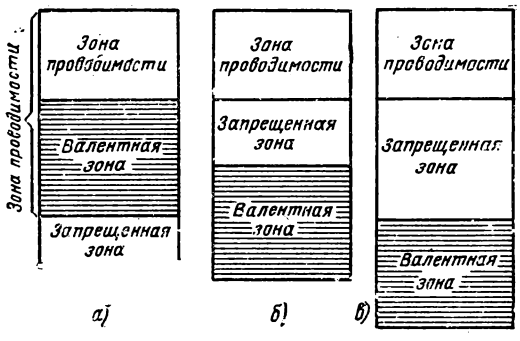


Рис. 3.3. Зонная структура при T=0 К:
а — для проводников; *б* — для полупроводников; *в* — для диэлектриков

Зонные структуры полупроводников (рис. 3.3, *б*) и диэлектриков (рис. 3.3, *в*) таковы, что валентная зона при нулевой температуре полностью заполнена электронами и ближайшая расположенная выше разрешенная зона (зона проводимости) отделена от нее запрещенной зоной. Разница между полупроводниками и диэлектриками заключается в ширине запрещенной зоны ΔW_3. Если для диэлектриков ΔW_3 достигает нескольких электрон-вольт (например, для алмаза ΔW_3=5,6 эВ), то для полупроводников она значительно меньше: для германия ΔW_3=0,67 эВ, для кремния ΔW_3= =1,11 эВ.

Энергетические уровни по высоте разрешенной зоны распределены неравномерно, плотность их изменяется от границы в глубь зоны. Таким образом, каждому уровню с энергией W соответствует определенная плотность $P(W)$ — число уровней, отнесенное к единице объема твердого тела.

Вероятность нахождения электрона на том или ином уровне определяется распределением Ферми—Дирака:

$$F_n(W) = \frac{1}{e^{\frac{W-W_F}{kT}} + 1},$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; W_F — энергия уровня Ферми.

Если энергию выражать не в джоулях, а в электрон-вольтах или вольтах (численно значения этих величин одинаковы), то необходимо энергии W и kT разделить на элементарный заряд e и формула перепишется в виде

$$F_n(W) = \frac{1}{e^{\frac{\varphi-\varphi_F}{\varphi_T}} + 1},$$

где φ — потенциал, характеризующий энергию, В; φ_F — уровень Ферми, В; $\varphi_T = kT/e$ — температурный потенциал, В.

При T=300 К (соответствует комнатной температуре) температурный потенциал

$$\varphi_T\,(300\text{К}) \approx 0{,}025\text{В} = 25\ \text{мВ}.$$

Потенциал уровня Ферми φ_F соответствует такому энергетическому уровню, вероятность заполнения которого равна 1/2. С физической точки зрения потенциал Ферми — электрохимический потенциал, который равен сумме электрического и химического потенциалов:

$$\varphi_F = \varphi_E + \varphi_x.$$

Химический потенциал характеризует возможность диффузии свободных частиц (заряженных и незаряженных). Химический потенциал является однозначной функцией концентрации соответствующих частиц. Наличие разности химических потенциалов означает наличие разности концентраций, а разность концентраций вызывает диффузию частиц в направлении от большей концентрации к меньшей. Электрический потенциал характеризует возможность дрейфа заряженных свободных частиц.

Потенциал Ферми, отсчитанный от границы той или иной зоны (т. е. без учета потенциальной энергии), есть химический потенциал соответствующих носителей.

Градиент потенциала Ферми, равный сумме градиентов электрического и химического потенциалов, характеризует оба типа движения носителей — диффузию и дрейф.

В условиях равновесия, когда нет направленного движения носителей, $\operatorname{grad}\varphi_F = 0$, т. е. φ_F=const. Постоянство («горизонтальность») уровня Ферми в равновесной системе является одним из фундаментальных положений квантовой теории твердого тела.

Полупроводники, у которых концентрация свободных носителей заряда меньше эффективной плотности состояний в разрешенной зоне, называют невырожденными. Для этих полупроводников справедливо распределение Максвелла—Больцмана

$$F_n = e^{-\frac{\varphi-\varphi_F}{\varphi_T}}.$$

В невырожденных полупроводниках уровень Ферми всегда расположен в запрещенной зоне. Полупроводники, у которых концентра-

ция свободных носителей заряда существенно превышает эффективную плотность состояний в разрешенной зоне, называют вырожденными или полуметаллами. Для них распределение Максвелла—Больцмана несправедливо. Уровень Ферми для вырожденных полупроводников расположен внутри соответствующей разрешенной зоны. Это относится также к металлам.

Переход электронов из валентной зоны в зону проводимости может происходить под воздействием тепловой или световой энергии, под действием электрического поля или какого-либо корпускулярного излучения. Для такого перехода энергия воздействия должна быть равна или превосходить ширину запрещенной зоны ($h\nu \geqslant \Delta W_3$). Вероятность перехода электрона в зону проводимости под воздействием тепла является экспоненциальной функцией температуры:

$$m = e^{-\Delta W_3 / kT}.$$

Для низких температур эта вероятность мала и полупроводники при температурах, близких к $T = 0$ К, ведут себя как диэлектрики. Однако уже при комнатной температуре концентрация электронов в зоне проводимости значительна. Так, у германия $n \approx 10^{19}$ м$^{-3}$.

При переходе электронов в зону проводимости в валентной зоне образуются вакантные квантовые состояния (дырки), которые ведут себя в кристаллической решетке подобно положительно заряженной частице с той же эффективной массой и зарядом, что и электроны. Концентрации электронов n_i в зоне проводимости и дырок в валентной зоне p_i одинаковы ($p_i = n_i$).

Собственная и примесная электропроводности полупроводников

Полупроводники, в которых концентрации электронов и дырок равны, называются собственными. Перенос электрических зарядов в таких полупроводниках при воздействии электрического поля осуществляется электронами и дырками, и электропроводность их называется собственной.

Удельная электрическая проводимость собственных полупроводников

$$\gamma = en_i \mu_n + cp_i \mu_p,$$

где e — заряд электрона; n_i, p_i — концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике; μ_n, μ_p — подвижности электронов и дырок.

Легирование собственного полупроводника примесью существенно влияет на его электрическую проводимость. Примесь нарушает периодичность кристаллической решетки и образует в энергетическом спектре полупроводника дополнительные уровни, которые располагаются в запрещенной зоне. Если энергетический уровень примеси находится вблизи дна зоны проводимости на расстоянии $\Delta W_д$ (рис. 3.4, *а*), то в этом случае более вероятным является переход электронов с уровней примеси в зону проводимости, так как $\Delta W_д \ll \Delta W_3$. Концентрация свободных электронов в таких полупроводниках увеличивается и становится существенно больше концентрации дырок. Такие примеси называются донорными. Электропроводность полупроводников, легированных донорной примесью, осуществляется главным образом электронами и поэтому называется электронной или *n*-типа (negativ — отрицательный). Электроны в таких полупроводниках являются основными носителями, дырки — неосновными.

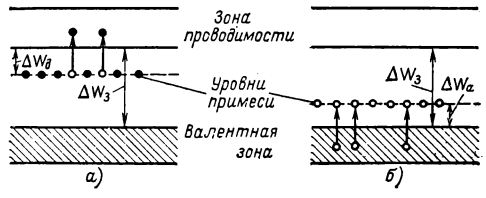


Рис. 3.4. Энергетические уровни примеси: *а* — донорная примесь; *б* — акцепторная примесь

Если уровни электронов атомов примеси располагаются вблизи валентной зоны (рис. 3.4, *б*), то под действием тепловой энергии валентные электроны могут переходить на уровни примеси, где они становятся связанными. В этом случае увеличивается концентрация дырок. Такие примеси называются акцепторными. Электропроводность полупроводников, легированных акцепторными примесями, осуществляется главным образом дырками и называется дырочной или *p*-типа (positive — положительный). Дырки в таких полупроводниках являются основными носителями, а электроны — неосновными.

Германий и кремний, в зависимости от типа внесенных в них примесей, могут иметь электронную или дырочную электропроводность. Германий и кремний принадлежит к IV группе элементов Периодической таблицы Д. И. Менделеева, и их атомы имеют по четыре валентных электрона. В твердом состоянии они имеют кристаллическую решетку типа алмаза, в которой каждый атом связан с четырьмя другими атомами ковалентными (парноэлектронными) связями. На рис. 3.5 изобра-

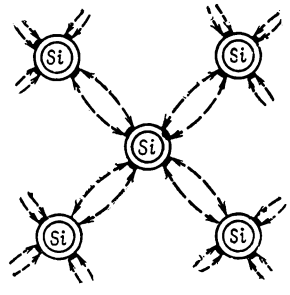


Рис. 3.5. Плоский эквивалент кристаллической решетки кремния

жен плоский эквивалент кристаллической решетки кремния. При внедрении в решетку кремния (или германия) атомов донорной примеси (элементов V группы), например мышьяка, фосфора или сурьмы, атом примеси замещает в ней атом основного элемента и образует четыре ковалентные связи с окружающи-

ми его атомами (рис. 3.6). Оставшийся пятый валентный электрон атома мышьяка связан с ним очень слабо, и этот электрон становится свободным. Таким образом, концентрация электронов в кремнии или германии при введении донорной примеси возрастает и электропроводность его становится электронной (*n*-типа).

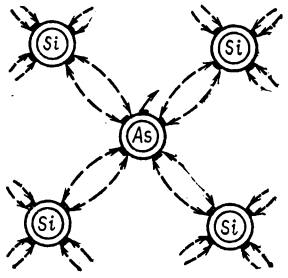


Рис. 3.6. Плоский эквивалент кристаллической решетки кремния, легированного донорной примесью

При внедрении в решетку кремния (или германия) атомов акцепторной примеси (элементов III группы), например бора, индия, алюминия или галлия, атом примеси замещает в ней атом основного элемента. Три валентных электрона атома примеси образуют ковалентную связь с валентными электронами соседних атомов основного полупроводника, а одна связь в решетке остается незаполненной. Заполнение этих связей осуществляется за счет валентных электронов соседних атомов, где в результате образуются дырки (рис. 3.7). Концентрация дырок в кремнии (или германии) при введении акцепторной примеси возрастает и электропроводность его становится дырочной (*p*-типа).

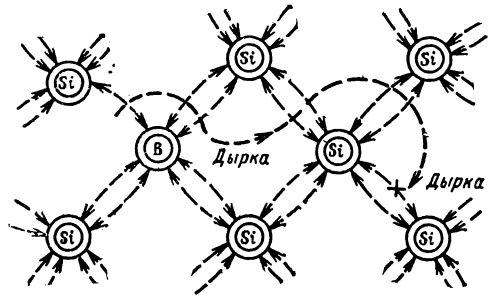


Рис. 3.7. Плоский эквивалент кристаллической решетки кремния, легированного акцепторной примесью

При одновременном введении в полупроводник донорной и акцепторной примесей характер электропроводности будет определяться примесью, имеющей более высокую концентрацию.

Контактные явления на границе полупроводника с металлом

Структура и свойства контактов полупроводника с металлом зависят от расположения уровней Ферми в них. Уровень Ферми в металле всегда расположен в зоне проводимости, а в невырожденном полупроводнике — в запрещенной зоне. В состоянии термодинамического равновесия системы, включающей в себя металл и полупроводник, уровень Ферми становится единым.

На рис. 3.8 приведены зонные диаграммы выпрямляющих контактов металла с полупроводниками *p*- и *n*-типов. Для контактирующих образцов металла и полупроводника *p*-типа, показанных на рис. 3.8, *а*, потенциал уровня Ферми в металле φ_{FM} выше потенциала уровня Ферми в полупроводнике. В этом случае энергетические уровни, соответствующие зоне проводимости полупроводника, в металле заполнены больше, чем в полупроводнике. Следовательно, после соприкосновения слоев часть электронов из металла перейдет в полупроводник и зарядит его отрицательно, металл при этом зарядится положительно. В результате на границе возникает электрическое поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов из металла. Наличие дополнительных электронов в граничном слое полупроводника *p*-типа приведет к уменьшению расстояния между уровнем Ферми и дном зоны проводимости, поэтому энергетические уровни в граничном слое искривляются вниз. При этом концентрация основных носителей заряда (дырок) в приконтактном слое полупроводника уменьшается, а неосновных (электронов) — увеличивается. Для контактирующих образцов металла и полупроводника *n*-типа, показанных на рис. 3.8, *б*, потенциал уровня Ферми в металле φ_{FM} ниже потенциала уровня Ферми в полупроводнике φ_{Fn}. В этом случае энергетические уровни, соответствующие зоне проводимости полупроводника, в металле заполнены

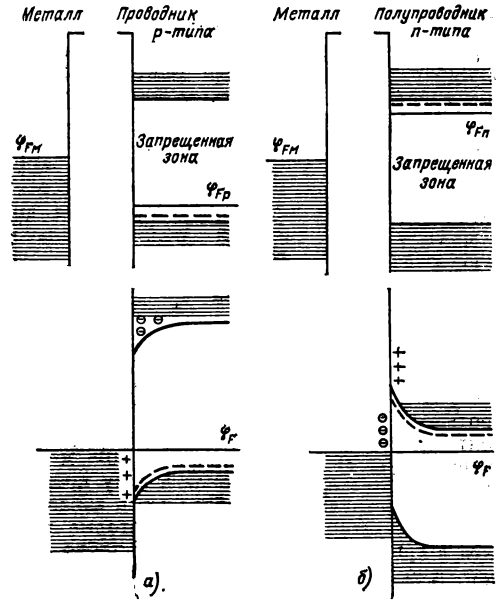


Рис. 3.8. Зонные диаграммы выпрямляющих контактов металла с полупроводником:
а — контакт с полупроводником *p*-типа; *б* — контакт с полупроводником *n*-типа

меньше, чем в полупроводнике. Следовательно, после соприкосновения слоев часть электронов из полупроводника перейдет в металл и зарядит его отрицательно, при этом полупроводник зарядится положительно. В результате на границе возникает электрическое поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов из полупроводника. Уменьшение концентрации электронов в граничном слое полупроводника приводит к увеличению расстояния между уровнем Ферми и дном зоны проводимости, поэтому зоны искривляются вверх, при этом концентрация основных носителей (электронов) уменьшается, а неосновных (дырок) — увеличивается.

Рассмотренные случаи контактов металла с полупроводником характеризуются уменьшением концентрации основных носителей заряда в граничном слое полупроводника по сравнению с концентрацией их в объеме вдали от границы контакта и, следовательно, увеличением удельного сопротивления граничного слоя.

В зависимости от приложенного внешнего напряжения и его полярности изменяется напряженность электрического поля в приповерхностном слое и соответственно изменяется сопротивление граничного слоя. Таким образом, контакты металла с полупроводником, показанные на рис. 3.8, обладают вентильными свойствами. На их основе созданы диоды Шоттки.

На рис. 3.9 показаны диаграммы энергетических зон для невыпрямляющих контактов металла с полупроводниками p- и n-типов, для которых выполняются соотношения $\varphi_{FM} < \varphi_{Fp}$ (рис. 3.9, *а*) и $\varphi_{FM} > \varphi_{Fn}$ (рис. 3.9, *б*). В этих случаях искривления зон в полупроводниках получаются обратными по сравнению с теми, что показаны на рис. 3.8, *а* и *б*. При этом граничные слои полупроводника обогащаются основными носителями заряда и сопротивление граничного слоя уменьшается по сравнению с нейтральными слоями. Суммарное сопротивление системы будет близко к сопротивлению нейтрального слоя полупроводника и не будет зависеть от внешнего напряжения и его полярности. Такие невыпрямляющие переходы являются основой омических контактов.

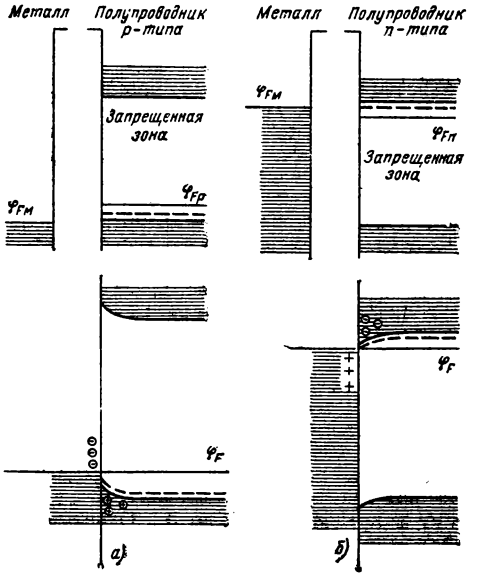


Рис. 3.9. Зонные диаграммы невыпрямляющих контактов металла с проводником:
а — контакт с полупроводником p-типа; *б* — контакт с полупроводником n-типа

Электронно-дырочный переход

На рис. 3.10 показана структура контакта двух полупроводников. Концентрация элек-

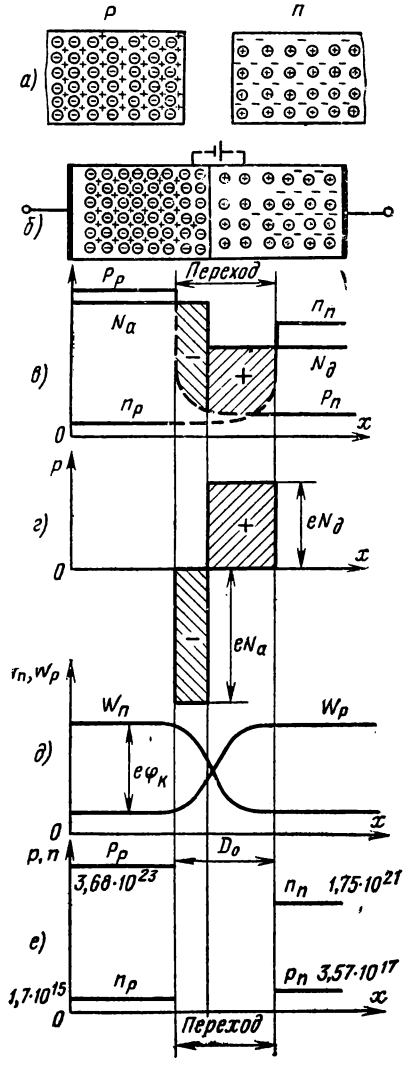


Рис. 3.10. Структура электронно-дырочного перехода в состоянии термодинамического равновесия:
а — распределение носителей заряда в полупроводниках p- и n-типов до образования контакта; *б* — то же в условиях контакта, но при отсутствии внешнего поля; *в* — распределение концентраций акцепторной и донорной примесей, а также концентраций основных и неосновных носителей заряда; *г* — распределение плотности пространственного заряда; *д* — изменение потенциальных энергий электронов W_n и дырок W_p; *е* — распределение концентраций основных и неосновных носителей заряда

тронов n_n в полупроводнике n-типа много больше концентрации электронов n_p в полупроводнике p-типа, а концентрация дырок p_p в полупроводнике p-типа много больше концентрации дырок p_n в полупроводнике n-типа. Наличие градиента концентраций на границе двух полупроводников создает диффузию электронов из слоя n в слой p, а дырок из слоя p в слой n. Диффузия основных носителей приводит к тому, что в приконтактной зоне полупроводника n-типа образуется нескомпенсированный положительный заряд ионов донорной примеси, а в полупроводнике p-типа — нескомпенсированный отрицательный заряд ионов акцепторной примеси.

Таким образом, в приконтактной зоне полупроводников различного типа образуется двойной электрический слой, который имеет малую концентрацию подвижных носителей заряда и обладает поэтому большим сопротивлением. График распределения плотности пространственного заряда в идеализированном виде приведен на рис. 3.10, *г*. На внешней границе и в глубине полупроводников заряд равен нулю, а в приконтактных зонах полупроводников n- и p-типов определяется соответственно концентрациями атомов донорной $N_д$ и акцепторной N_a примесей.

Двойной электрический слой, образующийся на границе электронного и дырочного полупроводников в результате диффузии основных носителей, называется электронно-дырочным переходом (p-n переходом).

Протяженность двойного электрического слоя характеризуется толщиной p-n перехода D_0 (рис. 3.10, *д*).

В зоне p-n перехода существует электрическое поле, напряженность которого направлена от полупроводника n-типа к полупроводнику p-типа. Это поле препятствует процессу диффузии основных носителей и вызывает дрейф неосновных носителей. На рис. 3.10, *д* приведены графики потенциальных энергий дырок и электронов. В глубине дырочного полупроводника потенциальная энергия дырок W_p равна некоторому постоянному значению, а при приближении к зоне p-n перехода энергия W_p начинает расти за счет потенциальной энергии электрического поля p-n перехода. В глубине слоя n-типа потенциальная энергия дырок максимальна и превосходит эту энергию в полупроводнике p-типа на $e\varphi_к$, обусловленную потенциальной энергией двойного электрического слоя. Для того чтобы дырки могли перейти из слоя p-типа в слой n-типа, они должны обладать энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера, высота которого $\Delta W_p = e\varphi_к$. Величина $\varphi_к$ называется контактной разностью потенциалов.

Потенциальная энергия электронов в слое n-типа равна некоторому постоянному значению, а при приближении к p-n переходу начинает расти. В полупроводнике p-типа эта энергия максимальна и превосходит энергию электронов области полупроводника n-типа на $e\varphi_к$. Для перехода электронов из полупроводника n-типа в полупроводник p-типа необходимо преодолеть потенциальный барьер, высота которого $\Delta W_n = e\varphi_к$ обусловлена потенциальной энергией поля. При переходе неосновных носителей (дырок в области n-типа и электронов в области p-типа) из одной области в другую происходит не преодоление потенциального барьера, а как бы «скатывание» с него.

Термоэлектрические и термомагнитные явления

Терморезистивный эффект — изменение электрического сопротивления проводника или полупроводника, обусловленное исключительно действием его нагревания. При температурах выше температуры Дебая сопротивление чистых металлов определяется, как правило, фононным механизмом рассеяния и увеличивается линейно с повышением температуры, поскольку возрастает рассеяние электронных волн на тепловых колебаниях решетки. Поэтому уменьшается их средняя длина свободного пробега, что означает уменьшение среднего свободного пробега $\bar{\lambda}$ электронов. При обычных температурах $\bar{\lambda}$ обратно пропорционально первой степени температуры, что приводит к прямой пропорциональности удельного электрического сопротивления $\rho = mu_0/n_0e^2\bar{\lambda}$ температуре (u_0 — скорость электрона, находящегося на верхнем занятом энергетическом уровне, n_0 — концентрация электронов, m и e — масса и скорость электрона). Скорость u_0 и концентрация n_0 в металле практически не зависят от температуры. Дифференциальный температурный коэффициент удельного сопротивления (ТКС)

$$\alpha = \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}.$$

для большинства чистых металлов положителен. У кобальта при 0 °С он равен $6{,}58\times\times10^{-3}$ К$^{-1}$, у α-марганца $0{,}17\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$. Ряд сплавов имеет весьма низкий или даже отрицательный температурный коэффициент сопротивления, обусловленный взаимодействием электронов с примесными атомами и другими дефектами кристаллической решетки. У манганина при 0 °С $\alpha = 4\cdot10^{-5}$ К$^{-1}$, при 40 °С $\alpha \approx 0$, минимальное значение (при 150 °С) $\alpha = -15\cdot10^{-5}$ К$^{-1}$. При низких температурах у некоторых веществ обнаруживается явление сверхпроводимости.

В металлах число носителей заряда и их энергия практически не зависят от температуры. В полупроводниках число носителей заряда значительно меньше, чем в металлах, однако их концентрация и энергия весьма сильно зависят от температуры. С ее повышением число свободных электронов и дырок резко возрастает. Например, в собственном полупроводнике $n_i = p_i = n_0e^{-\Delta W/2kT}$, где ΔW энергия активации. Подвижность носителей также меняется с температурой. Например, подвижность носителей заряда, обусловленная рассеянием электронов тепловыми колебаниями решетки, $\mu \sim T^{-q}$, где в монокристаллических полупроводниках показатель степени q лежит в пределах от 1 до 3. Окисные полупроводниковые материалы обладают отрицательным ТКС. Монокристаллические полупроводниковые материалы позволяют получать как отрицательные, так и положительные ТКС. В терморезисторе типа СТ1-21 при 20 °С $\alpha = (3{,}25 \div 5{,}75)\cdot10^{-2}$ К$^{-1}$.

Ферриты в ненамагниченном состоянии имеют температурные характеристики до точки Кюри, аналогичные по форме таким же характеристикам полупроводников. В ненамагниченных ферритовых термисторах $\alpha = (3—20) \times 10^{-2}$ К$^{-1}$.

Особенностью температурных характеристик $\rho = f(T)$ ферритов является наличие изломов. В ферритах со структурой шпинели изломы располагаются вблизи точки Кюри, что обусловлено магнитными превращениями. Характеристики иттриевых ферритов имеют в области температур до точки Кюри резкие изломы, обусловленные переходом от примесной к собственной проводимости. Благодаря этому в области высоких положительных температур резко возрастает ТКС. Например, для некоторых ферритных терморезисторов при температуре 500 °С ТКС может составлять 2—3 %, тогда как для многих полупроводниковых терморезисторов он имеет такое значение лишь при температурах не выше 20 °С.

Особенностью терморезистивного эффекта в намагниченном феррите является частотная зависимость электрического сопротивления. Вблизи частоты ферромагнитного резонанса сопротивление резко уменьшается и приобретает невзаимный характер для прямых и обратных волн в волноводах.

Электротермический эффект (Томсона) заключается в выделении или поглощении тепла

$$Q_S = S(T_2 - T_1)\, It\,,$$

при прохождении тока I за время t в однородном проводнике, в котором имеется перепад температур T_2—T_1. Коэффициент Томсона S зависит от природы материала. Если ток направлен в сторону повышения температуры и коэффициент S положителен, теплота выделяется, а при $S<0$ — поглощается. При 300 К для алюминия $S=0{,}08$ мкВ/К, для меди $S=+1{,}52$ мкВ/К. При 323 К для константана $S=-24{,}6$ мкВ/К.

Электротермический эффект можно рассматривать как результат переноса током электронов из нагретой части проводника (с большой кинетической энергией) в холодную часть. Перенесенная избыточная кинетическая энергия электронов распределяется между всеми элементарными частицами, в частности атомами кристаллической решетки, что и воспринимается как выделение теплоты Q_S (сверх джоулевой теплоты).

Термоэлектродный эффект (эффект Зеебека) состоит в том, что в замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных металлов или полупроводников, места соединения которых находятся при разных температурах (T_1 и T_2), возникают электрический ток (термоэлектрический) и ЭДС E_{12}, называемая термо-ЭДС. В небольшом интервале температур $E_{12} = e_{12}(T_1 - T_2)$, где коэффициент термо-ЭДС

$$e_{12} = \int_0^T \frac{S_1}{T}\,dT - \int_0^T \frac{S_2}{T}\,dT = e_1 - e_2,$$

причем S_1 и S_2 — коэффициенты Томсона пары соединенных материалов, e_1 и e_2 — абсолютные коэффициенты термо-ЭДС этих материалов. Термо-ЭДС положительна, если ток в нагретом спае направлен из материала 2 в материал 1. Абсолютные коэффициенты термо-ЭДС при 20 °С для свинца, меди и платины равны соответственно —1,26; +1,86; —5,13 мкВ/К. По отношению к этим металлам в таблицах обычно приводятся термо-ЭДС других материалов. Коэффициент термо-ЭДС термоэлемента, образованного веществами m и n, $e_{mn} = e_{mk} + e_{kn} = e_{mk} - e_{nk}$. Знаки коэффициентов e и полярности термоэлектродов определяются из условия: в холодном спае ток направлен от положительного термоэлектрода к отрицательному. Коэффициент термо-ЭДС пары материалов связан с их коэффициентами Томсона соотношением

$$\frac{de_{12}}{dT} = \frac{S_1 - S_2}{T}\,.$$

Термоэлектродный эффект при нагреве спая двух электродов с электронной проводимостью объясняется диффузией горячих электронов в сторону холодного спая с меньшей концентрацией «холодных» электронов. Эти явления наиболее слабо выражены у типичных металлов и наиболее сильно — у полупроводников. Стационарное значение термо-ЭДС устанавливается после того, как диффузионный ток уравновешивается обратным потоком электронов под влиянием возникающего электрического поля. При этом устанавливается избыточная концентрация электронов вблизи холодного спая. Термо-ЭДС появляется в результате неравенства разностей потенциалов в двух разнородных электродах.

Аналогично протекают процессы переноса дырок. В дырочных полупроводниках холодный спай приобретает положительный потенциал по отношению к горячему. Очевидно, что наибольшую термо-ЭДС можно получить при комбинировании термоэлектродов из электронного и дырочного полупроводников. Эта термо-ЭДС достигает 1 мВ/К, что в десятки и сотни раз больше, чем в металлах. Коэффициент полезного действия полупроводниковых термоэлементов достигает 10 %.

Эффект Пельтье заключается в выделении или поглощении теплоты в месте соединения двух разнородных проводников при прохождении тока I. Это количество теплоты

$$Q_П = \Pi It$$

пропорционально прошедшему через контакт заряду It и коэффициенту Пельтье $\Pi = eT$ (e — коэффициент термо-ЭДС).

Эффект Пельтье объясняется различием средних энергий носителей заряда в двух контактирующих проводниках. Когда носители заряда, переносимые током через контакт, переходят из вещества с большей энергией носителей в вещество с меньшей энергией носителей, энергия их уменьшается путем передачи избытка кристаллической решетки, этот избыток энергии и выделяется в виде теплоты Пельтье. Применяя контакт полупроводников с высокой термо-ЭДС, можно создать на его основе достаточно экономичную холодильную установку.

Термогальваномагнитный эффект заключается в возникновении поперечной напряженности электрического поля в проводнике вследствие продольного градиента температур и по-

перечного магнитного поля. Это явление иногда называют эффектом Нернста—Эттингсхаузена.

Поперечным термогальваномагнитным эффектом (эффектом Эттингсхаузена) называют явление, при котором возникает поперечный градиент температур в полупроводнике с током вследствие разброса скоростей носителей в поперечном магнитном поле.

Продольным термогальваномагнитным эффектом (эффектом Нернста) называют возникновение продольного градиента температур в полупроводнике с током вследствие разброса скоростей носителей зарядов в поперечном магнитном поле.

Термомагнитным эффектом (эффектом Реги—Ледюка) называется возникновение поперечного градиента температур в полупроводнике при наличии продольного градиента температур в поперечном магнитном поле.

Гальваномагнитные явления

Гальваномагнитными называют явления, возникающие под действием магнитного поля в проводниках и полупроводниках с электрическим током. Техническое применение получили три гальваномагнитных явления: эффект Холла, магниторезистивный и магнитодиодный эффекты. Первые два обусловлены действием магнитного поля на равновесные носители заряда, а последний — на неравновесные носители заряда (в полупроводнике).

Эффект Холла проявляется в возникновении электрического поля с напряженностью $\boldsymbol{E}=R\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}$, перпендикулярной векторам магнитной индукции $\boldsymbol{B}$ и плотности тока $\boldsymbol{J}$. Коэффициент (или постоянная) Холла R может быть положительным и отрицательным и даже изменять знак с изменением температуры. Эффект Холла является следствием того, что на заряженную частицу (электрон и дырку), перемещающуюся в магнитном поле, действует сила, пропорциональная векторному произведению скорости частицы на магнитную индукцию. Под влиянием этой силы движущиеся в направлении электрического поля, созданного в образце внешними источниками тока, носители заряда отклоняются в поперечном направлении.

В ферромагнетиках на электроны, кроме внешнего поля с напряженностью H, действует поле доменов, определяющее намагниченность M образца. При этом наблюдается особый, ферромагнитный эффект Холла. Экспериментально найдено, что напряженность поперечного электрического поля (в направлении оси y)

$$E = (R_0 H + R_s M)\, J,$$

где J — плотность тока (в направлении оси x); R_0 — обыкновенный коэффициент Холла; R_s — так называемый спонтанный или ферромагнитный коэффициент Холла. С повышением температуры коэффициент R_s возрастает, достигая максимума в точке Кюри, а затем снижается.

Для большинства неферромагнитных металлов коэффициенты Холла почти не зависят от температуры.

Гальваномагнитные эффекты очень чувствительны ко всякого рода примесям и неоднородностям. Поэтому приведенные в табл. 3.1 значения коэффициента Холла надо рассматривать лишь как наиболее вероятные.

Таблица 3.1. **Коэффициенты Холла для металлов (вблизи комнатной температуры)**

Металл	R, 10^{-10} м³/Кл	Металл	R, 10^{-10} м³/Кл
Na	−2,1	W	+1,18
Mg	−0,83	Pt	−1,27
K	+4,2	Au	−0,705
Cu	−0,536	Ng	−0,76
Mo	+1,80	As	+45,2
Sn	−0,022		

В полупроводниках дрейфующие в электрическом поле электроны и дырки отклоняются магнитным полем к одной и той же грани образца. У этой грани происходит их накопление до тех пор, пока созданное ими «поле Холла» и возникающий градиент концентрации носителей заряда не скомпенсируют силу Лоренца. Знак возникающей ЭДС Холла зависит от типа электропроводности.

В полупроводнике с одним типом электропроводности сила Лоренца полностью компенсируется полем Холла. В итоге на боковых гранях образца возникает разность потенциалов, а носители заряда, движущиеся со средней скоростью дрейфа, не отклоняются под действием магнитного поля от направления внешнего электрического поля. В полупроводнике с двумя типами носителей заряда поле Холла меньше и компенсирует силу Лоренца для каждого из типов носителей заряда не полностью. Поэтому их движение отклоняется от направления внешнего электрического поля. Для характеристики этого эффекта помимо коэффициента Холла используются «холловская подвижность» $\mu_H = |R\sigma|$ и «угол Холла», на который отклонились бы носители в данном магнитном поле при отсутствии поля Холла, $\theta \approx \mu B$ (μ — обычная подвижность носителя заряда и σ — удельная электрическая проводимость).

Магниторезистивный эффект, называемый также эффектом Гаусса, заключается в изменении электрического сопротивления под воздействием магнитного поля. Он обусловлен уменьшением пути, проходимого носителями заряда между актами рассеяния, при наличии магнитного поля. Дело в том, что даже при наличии поля Холла и в примесном полупроводнике вследствие теплового движения всегда есть носители заряда, движущиеся со скоростями, как бо́льшими, так и меньшими средней скорости дрейфа во внешнем электрическом поле. Таким образом, направление движения практически всех носителей заряда в магнитном поле не совпадает с направлением внешнего электрического поля. Магниторезистивный эффект считается положительным, если при появлении магнитного поля сопротивление возрастает. Отрицательный эффект (уменьшение сопротивления) обычно наблюдается при низких температурах и пока не используется для создания гальваномагнитных приборов.

У большинства полупроводников и металлов (за исключением ферромагнитных) сопротивление с ростом напряженности магнитного поля возрастает.

При обычно используемых магнитных индукциях $B \ll 10$ Тл и комнатной температуре «магнитосопротивление» $\Delta\rho/\rho_0$ ($\Delta\rho$ — изменение сопротивления в магнитном поле, ρ_0 — сопротивление при $B=0$) для большинства металлов весьма мало. Например, для меди $\Delta\rho/\rho_0 = 10^{-4}$ при $B=2$ Тл. Исключением является висмут, у которого $\Delta\rho/\rho_0 \approx 2$ при $B=3{,}1$ Тл. В полупроводниках этот эффект значительно больше, чем в металлах. Например, в германии при 100 К и $B=2$ Тл $\Delta\rho/\rho_0 \approx 3$.

Зависимость магнитосопротивления от магнитной индукции в полупроводниках близка к квадратичной. Это сопротивление тем больше, чем больше подвижность носителей заряда:

$$\Delta\rho/\rho_0 \approx \Delta\mu/\mu_0 \approx A(\mu B)^2,$$

где A — коэффициент.

Магниторезистивный эффект зависит от угла между направлениями магнитной индукции и плотности тока. Максимум наблюдается, когда эти направления перпендикулярны, а минимум — при совпадении этих направлений.

Магнитодиодным эффектом называется явление резкого возрастания сопротивления диода в прямом направлении под воздействием поперечного магнитного поля.

Наиболее отчетливо этот эффект проявляется при несимметричном p-n переходе и удлиненной базе, т. е. когда концентрация равновесных носителей заряда, например в p-области много больше, чем в n-области, и расстояние между p-n переходом и контактом значительно превышает длину диффузионного смещения. Тогда прямой ток очень сильно зависит от отношения толщины базовой области d к диффузионной длине L и практически все напряжение при прямом смещении приходится на базу, напряжение на p-n переходе составляет малую его долю.

Резкое возрастание сопротивления такого диода после появления поперечного магнитного поля обусловлено совместным действием трех явлений. Во-первых, уменьшается подвижность носителей заряда. Влияние магнитного поля особенно значительно на неосновные носители заряда, благодаря тому что поле Холла, созданное основными носителями, усиливает искривление траектории дрейфа неосновных носителей заряда. Во-вторых, уменьшается их диффузионная длина (средний путь диффундирующего носителя за среднее время жизни). В-третьих, уменьшается инжекция дырок из p-n перехода вследствие увеличения сопротивления базы и дальнейшего уменьшения напряжения на p-n переходе.

Магнитооптические явления

Магнитооптическими называют явления, в которых проявляется влияние магнитного поля на излучение и распространение света. К ним, в частности, относятся эффекты Фарадея, Коттона — Мутона, Керра и циклотронный резонанс.

Эффектом Фарадея называется поворот плоскости поляризации света, прошедшего сквозь среду, находящуюся во внешнем магнитном поле. Поворот плоскости поляризации возникает вследствие различия фазовых скоростей циркулярно поляризованных волн с правым и левым вращением, на которые распадается линейно поляризованная волна в гиротропной среде. В общем случае угол удельного (на единицу длины) поворота плоскости поляризации

$$F = \frac{\pi}{\lambda}\left(n'_- - n'_+\right),$$

где λ — длина волны; n'_+ и n'_- — действительные компоненты показателей преломления для право- и левополяризованных волн.

В ферромагнитных материалах для света, распространяющегося вдоль направления намагниченности насыщения M_s, удельное фарадеевское вращение плоскости поляризации

$$F = KM_s,$$

где K — постоянная Кундта; F — угол (считается положительным, если при распространении света вдоль направления магнитного поля плоскость поляризации вращается по часовой стрелке).

Добротность или «качество» магнитооптических сред оценивается отношением $2F/\alpha$, где α — коэффициент поглощения в законе ослабления интенсивности света $I = I_0 \exp(-\alpha l)$. Параметры некоторых ферромагнитных материалов при температуре 300 К приведены в табл. 3.2 [3.6].

Таблица 3.2. **Магнитооптические характеристики веществ**

Вещество	M_s, кА/м	λ, нм	F, °/м	α, м$^{-1}$	$2F/\alpha$
Fe	1730	546	$3{,}5\cdot10^7$	$7{,}6\cdot10^7$	0,92°
Co	1444	546	$3{,}6\cdot10^7$	$8{,}5\cdot10^7$	0,85
Ni	508	546	$0{,}99\cdot10^7$	$8{,}0\cdot10^7$	0,25
Пермаллой Ni : Fe (82 : 18 %)	848	500	$1{,}22\cdot10^7$	$6\cdot10^7$	0,4
MnBi	611	450	$4{,}2\cdot10^7$	$6{,}1\cdot10^7$	1,4
YIG	198	1200	$2{,}5\cdot10^4$	6,9	7000

Эффект Фарадея в полупроводниках обусловлен поляризацией как связанных, так и свободных электронов.

Эффектом Коттона—Мутона (или Фохта) называют двойное лучепреломление света, распространяющегося перпендикулярно направлению магнитного поля. При этом линейно поляризованная волна преобразуется в общем случае в эллиптически поляризованную волну. Эффект возникает вследствие различия фазовых скоростей обыкновенной и необыкновенной волн, на которые распадается линейно поляризованная волна в поперечно-намагниченной среде.

Магнитооптический эффект Керра проявляется во влиянии намагниченности ферромагнитного материала на поляризацию отражен-

ного от его поверхности света. Как и эффект Фарадея, он обусловлен различием показателей преломления намагниченной среды для право- и левополяризованных волн. В зависимости от взаимной ориентации плоскости падения света и намагниченности различают три разновидности магнитооптического эффекта Керра. «Полярный» эффект возникает, когда вектор намагниченности перпендикулярен отражающей поверхности; в «меридиональном» (продольном) эффекте вектор намагниченности параллелен как отражающей поверхности, так и плоскости падения; при «экваториальном» (поперечном) эффекте вектор намагниченности параллелен отражающей поверхности, но перпендикулярен плоскости падения.

Циклотронным эффектом называют тенденцию носителей заряда закручиваться в спираль вокруг направления магнитного поля с угловой частотой $\omega_c = eB/m_i$, называемой циклотронной, при которой поглощение света достигает максимума, а ширина резонансной кривой равна частоте соударений $\nu_i = 1/\theta_i$, т. е. позволяет определить время свободного пробега θ_i.

Внутренний фотоэффект

Внутренним фотоэффектом называют явления, происходящие внутри кристаллической решетки при воздействии светового потока и приводящие к перераспределению электронов по энергетическим состояниям и изменению электрических свойств освещаемого образца — его проводимости и внутреннего электрического поля. В отличие от внешнего фотоэффекта (см. § 3.5), заключающегося в эмиссии электронов, при внутреннем фотоэффекте происходит изменение только энергетического состояния электронов, приводящее к изменению концентрации свободных носителей заряда, а также к перераспределению их внутри кристалла. Внутренний фотоэффект характерен только для полупроводников и диэлектриков, тогда как внешний фотоэффект наблюдается при освещении любых веществ.

В случае внутреннего фотоэффекта первичным процессом является световая инжекция (оптическая генерация) избыточных носителей заряда. Образование неравновесных носителей здесь происходит при поглощении энергии фотонов. Этот процесс зависит как от внешних факторов (интенсивности и длины световой волны), так и от внутренних (геометрии образца, коэффициентов поглощения, диффузии и рекомбинации).

В зависимости от условий внутренний фотоэффект может приводить к вторичным явлениям самого различного характера. Так, в отсутствие внешних полей неравномерное освещение однородного полупроводника приводит к возникновению электрического поля, связанного с *кристаллом-фотоэффектом*. Если на пластинку полупроводника падает свет, то между освещенной и параллельной ей неосвещенной поверхностями возникает ЭДС. Появление ЭДС может быть связано со значительным диффузионным током избыточных носителей заряда, вызывающим падение напряжения на образце. Однако ЭДС возникает и в случае тонкой пластинки, когда диффузией можно пренебречь. При этом фото-ЭДС будет обусловлена разностью между квазиуровнями Ферми на передней (освещенной) и задней поверхностях. Возникновение разности потенциалов между освещенной и затемненной частями однородного полупроводника может происходить и в результате биполярной диффузии носителей заряда с разными подвижностями. Фотодиффузионную разность потенциалов иногда называют ЭДС Дембера.

При наблюдении внутреннего фотоэффекта в электрическом поле обнаруживается *фоторезистивный эффект*. Он заключается в изменении электрической проводимости полупроводника под действием освещения. Изменение проводимости происходит в результате появления неравновесных носителей (Δp, Δn), возникающих при поглощении фотонов. При этом прирост удельной проводимости составляет $\Delta\sigma = e(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p)$.

При наблюдении внутреннего фотоэффекта в магнитном поле обнаруживается *фотомагнитоэлектрический эффект* (эффект Кикоина-Носкова). Он заключается в возникновении электрического поля, направленного перпендикулярно световому потоку и магнитному полю в полупроводнике. Это электрическое поле образуется в результате отклонения магнитным полем диффузионного тока фотоэлектронов и фотодырок, образующихся вблизи освещенной поверхности. Поэтому фотомагнитный эффект можно рассматривать как эффект Холла на фотодиффузионном токе. Прямая пропорциональность фотомагнитного эффекта интенсивности освещения и магнитной индукции (при небольших освещенностях и магнитных полях) дает возможность создать на его основе приемники инфракрасного излучения и магнитометры.

При освещении электронно-дырочного перехода обнаруживается *фотогальванический эффект*. Он проявляется в возникновении ЭДС либо тока в результате разделения носителей заряда (генерируемых в полупроводнике под действием внутреннего фотоэффекта) электрическим полем, обусловленным неоднородностью полупроводника. Возникающая при этом ЭДС (фото-ЭДС) является причиной появления напряжения на фотодиодах, фототранзисторах и полупроводниковых преобразователях солнечной энергии в электрическую (солнечные батареи).

Люминесценция

Люминесценцией называют явление поглощения веществом энергии с последующим электромагнитным излучением в видимой области спектра или близкой к ней. Точнее, люминесценцию определяют как излучение, избыточное над тепловым излучением тела в данной спектральной области, если оно обладает длительностью, значительно превышающей период световых колебаний. В зависимости от способов возбуждения люминесценции различают: фотолюминесценцию (за счет поглощения энергии света), электролюминесценцию (при поглощении электрической энергии), катодолюминесценцию (при бомбардировке электронами), рентгенолюминесценцию (от рентгеновского излучения), радиолюминесценцию (от гамма-лучей), триболюминесценцию (при механическом воздействии), хеми- и биолюминесценцию (при

химических и биологических процессах). Если люминесценция происходит во время возбуждения, то ее называют *флюоресценцией*; если она продолжается некоторое время после окончания возбуждения — *фосфоресценцией.*

Различие между перечисленными видами люминесценции связано с процессом поглощения энергии, а не с тем, как она превращается в световую. Известны два основных механизма люминесцентного излучения. При первом из них излучение фотона происходит в акте рекомбинации пары электрон—дырка. Подобные процессы происходят, в частности, при инжекции неосновных носителей вблизи *p-n* перехода (в светоизлучающих диодах). Такое излучение наблюдается в кристаллах CdS, SiC, Ge, Si и некоторых полупроводниковых соединениях типа $A^{III}B^{V}$. Второй, нерекомбинационный механизм связан с переходом люминесцентного центра из возбужденного состояния в основное. Процессы такого рода наблюдаются в фосфоре и сульфиде цинка (ZnS—Cu, Mn). Возбуждение происходит здесь при столкновении с электроном, разгоняемым сильным локальным электрическим полем.

Электролюминесцентные ячейки используются в области освещения, индикации и системах обработки информации, в частности в оптоэлектронике. Параметры отечественных электролюминофоров приведены в табл. 3.3 [3.7].

Таблица 3.3. **Характеристики электролюминофоров**

Марка	Состав	Цвет свечения	Длина волны в максимуме излучения, нм	Яркость свечения, кд/м²	
				начальная	через 2000 ч
ЭЛ-455С	ZnS—Cu	Синий	455	20	6
ЭЛ-455	ZnS—Cu	Голубой	455	20	6
ЭЛ-510М	ZnS—Cu, Al	Зеленый	510	60	15
ЭЛ-515	ZnS—Cu	»	515	70	18
ЭЛ-580М	ZnS—Cu, Mn	Желтый	580	20	7

Примечание. Данные по яркости свечения приведены для электролюминесцентных конденсаторов, изготовленных с применением эпоксидного лака ЭП-96, при толщине электролюминесцентного слоя 60 мкм, напряжении 220 В и частоте 400 Гц.

3.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Процессы намагничивания

Ферромагнетики обладают доменной структурой. Намагниченность домена равна намагниченности насыщения материала. Ее можно заметно изменить только путем изменения температуры. При наложении внешнего поля изменяется свободная энергия домена за счет появления нового слагаемого — энергии магнитных моментов во внешнем поле. В результате домены приобретают равновесное состояние уже при ином расположении, нежели в отсутствие магнитного поля. Таким образом,

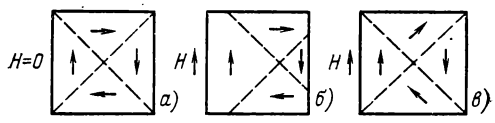


Рис. 3.11. Изменение доменной структуры при намагничивании

возникает некоторая средняя намагниченность тела в направлении, близком к направлению внешнего поля.

Изменение намагниченности образца (рис. 3.11, *а*) при постоянных температуре и намагниченности доменов происходит в результате:

перемещения границ и соответствующего изменения объема доменов с ростом тех из них, у которых намагниченность $\boldsymbol{M}_s$ составляет острый угол с внешним магнитным полем H (рис. 3.11, *б*);

процессов вращения, связанных с поворотом векторов $\boldsymbol{M}_s$ внутри домена (рис. 3.11, *в*).

Оба процесса могут быть разделены в свою очередь на обратимые и необратимые в зависимости от доли энергии, рассеиваемой в виде теплоты. Необратимые процессы намагничивания определяют все явления магнитного гистерезиса.

Процессы смещения играют основную роль в области слабых полей на начальном участке кривой намагничивания. Процессы вращения играют основную роль в области полей, бо́льших тех, при которых крутизна кривой намагничивания достигает максимума. Процессы смещения заканчиваются с исчезновением доменной структуры, а процессы вращения — при полном насыщении материала.

Расположение границ между областями самопроизвольной намагниченности определяется минимумом полной свободной энергии тела, включающей поверхностную энергию границ, магнитоупругую энергию областей и энергию внутренних магнитных полей рассеяния. Это условие должно выполняться и при обратимом смещении границ.

Смещение границ между смежными доменами может произойти, если по разные стороны от стенки будет различна плотность свободной энергии внешних сил. Полная работа внешнего давления при смещении граничной поверхности идет на покрытие роста энергии, связанной с силами магнитоупругой анизотропии, и компенсацию изменения поверхностной энергии. Последние изменения происходят в общем случае в силу локального изменения энергии стенки домена при перемещении слоя в новые места кристалла, а также в силу изменения кривизны поверхности стенки и деформации ограничивающего контура.

Обратимые процессы вращения вектора спонтанной намагниченности вызываются теми же причинами, что и смещение стенок. Однако здесь процесс определяется зависимостью энергии анизотропии, магнитоупругой энергии и энергии домена в магнитном поле от ориентации вектора намагниченности.

Необратимые процессы намагничивания ферромагнетиков определяются тремя явлениями: задержкой роста зародышей перемагничивания, задержкой смещения границ между доменами и необратимыми процессами вращения.

Зародышами намагничивания называют объемы с самопроизвольной намагниченностью обратного направления (по отношению к основной ориентации намагниченности насыщения образца). Их возникновение может быть связано с двумя основными источниками. Во-первых, они могут возникнуть в результате того, что даже при насыщении образца остаются небольшие участки первоначальных доменов с направлением намагниченности, противоположным первоначальному направлению магнитного поля. Во-вторых, размагничивающее поле, созданное пустотами, посторонними включениями и внутренними неоднородностями образца, может сделать внутреннее поле в небольших объемах вблизи таких искажений обратным по отношению к внешнему полю.

В чистом виде задержку роста зародышей можно наблюдать в образцах с прямоугольной петлей гистерезиса, когда при плавном изменении внешнего поля изменение намагниченности происходит одним скачком. При некотором поле старта зародыш начинает расти с конечной скоростью и поглощает весь объем образца. Это поле нужно для создания таких размеров зародыша перемагничивания, которые делают его дальнейший рост энергетически более выгодным, чем его исчезновение. После достижения поля старта и начала роста зародыша с установившейся скоростью рост может продолжаться при более слабом поле. Минимальное значение этого поля называется критическим. Оно определяется теми потенциальными барьерами, которые должна преодолевать граница перемагничивающейся области при движении через неоднородности материала.

Задержка в смещении границ доменов связана также с некоторыми видами неоднородностей, поскольку при их прохождении происходит образование локальной доменной структуры. По мере удаления основной границы от неоднородности сначала увеличиваются границы маленьких доменов, а затем после их внезапного отрыва от основной границы вокруг полости устанавливается новая доменная структура и выпрямляется основная стенка. Задерживающее действие неоднородности приводит к увеличению поля, необходимого для осуществления движения основной границы в окрестности неоднородности. Другие неоднородности, большие и малые, сказываются подобным же образом на смещении других границ и определяют коэрцитивную силу.

Если в ферромагнитном материале исключена возможность возникновения зародышей перемагничивания, то в нем вообще исключены процессы смещения и перемагничивание может осуществляться лишь с помощью процесса вращения вектора намагниченности. Необратимый характер процессов перемагничивания как при смещении доменных границ, так и при вращении находит свое выражение в неоднозначности кривой намагничивания между отрицательным и положительным значениями коэрцитивной силы. Два устойчивых значения намагниченности на этом участке соответствуют двум минимумам свободной энергии, разделенным потенциальным барьером. Коэрцитивная сила соответствует тем граничным точкам этого двузначного участка, где энергетический барьер исчезает.

Вихревые токи при перемагничивании и магнитная вязкость

Процессы намагничивания и перемагничивания зависят не только от внешнего магнитного поля, но и от скорости его изменения. Одной из причин этого является размагничивающее действие вихревых токов, возникающих при движении доменной стенки. Их создает электрическое поле, индуцируемое в тех областях, в которых произошло изменение направления намагниченности. Напряженность электрического поля и плотность вихревых токов зависят от скорости движения доменной стенки. Они определяются условием иметь в каждый момент времени в неперемагниченном объеме напряженность результирующего магнитного поля не больше коэрцитивной силы.

Задержку в изменении намагниченности ферромагнитного образца, которую нельзя отнести к действию вихревых токов, объясняют явлением, которое называется «магнитной вязкостью».

Такого рода магнитное последействие бывает двух типов: зависящее и не зависящее от температуры.

Временные эффекты в ферромагнетике условно можно также разделить на электронные и ионные. Электронные эффекты связаны с перераспределением электронной плотности оболочек $3d$ и $4s$. По-видимому, этими процессами можно объяснить очень большие времена релаксации в марганцово-цинковых ферритах при низких температурах, когда практически не происходит процесса диффузии ионов.

Ионные эффекты магнитного последействия связаны со структурными изменениями в кристаллической решетке. Именно этим может быть объяснено то, что в карбонильном железе присутствие следов углерода приводит к появлению температурно-зависимого послесвечения. В нормальном состоянии, т. е. до упругой деформации, атомы углерода в кристаллической решетке располагаются с одинаковой вероятностью в любом промежутке между атомами железа, например в центрах граней или ребер элементарной кубической ячейки. Под действием напряжений расстояния между атомами железа в соответствующих направлениях увеличиваются, повышая вероятность расположения атомов углерода именно в направлениях. Длительность перераспределения атомов углерода после наложения напряжений и определяет длительность как упругого, так и магнитного последействия. Связь между ними обусловлена зависимостью магнитных свойств от механических напряжений и магнитострикцией.

Динамическую петлю перемагничивания можно лишь условно назвать петлей гистерезиса, поскольку ее форму, кроме остаточного влияния предшествующих состояний, определяют вихревые токи и магнитная вязкость. Именно под влиянием вихревых токов и вязкости динамическая петля при возрастании частоты приобретает эллиптический характер. В слабых полях петля имеет форму, также близкую к эллипсу.

Признаком такой формы петли является синусоидальный характер изменения одновременно напряженности магнитного поля $H(t) = H_m \sin \omega t$ и магнитной индукции $B(t) = B_m \sin(\omega t - \delta)$, т. е. отсутствие у них выс-

ших гармоник. В этом случае намагниченную среду характеризует комплексная относительная магнитная проницаемость $\underline{\mu}_r = B/\mu_0 H = \mu_r e^{-j\delta} = \mu_{r1} - j\mu_{r2}$, где $\underline{\mu}_r = B_m/\mu_0 H_m = B/\mu_0 H$ — амплитудная проницаемость. Действительная часть $\mu_{r1} = \mu_r \cos\delta$ соответствует обратимым квазиупругим процессам, а мнимая часть $\mu_{r2} = \mu_r \sin\delta$ — процессам, связанным с рассеянием энергии. Потери энергии на перемагничивание характеризуются удельной мощностью $p_0 = \omega\mu_{r2}\mu_0 H^2 = \omega\mu_{r1}\mu_0 H^2 \operatorname{tg}\delta = \omega ab/2$, где a и b — полуоси эллипса в координатах H и B.

Фазовый сдвиг δ определяет потери на перемагничивание, т. е. энергию, рассеиваемую на необратимые процессы. Поэтому его называют «углом потерь», причем $\operatorname{tg}\delta = \mu_{r2}/\mu_{r1}$.

В ферромагнитном образце конечных размеров вследствие поверхностного эффекта возникает неравномерное распределение электромагнитного поля, являющееся функцией координат и времени. Это вносит дополнительные осложнения при исследовании и расчете и без того сложных динамических характеристик среды, обладающей магнитной вязкостью и нелинейными статическими характеристиками. В результате этого средняя комплексная магнитная проницаемость образца, в частности пластины или ленты, оказывается отличной от комплексной магнитной проницаемости материала, причем в разной степени для разных частот, крутизн и форм изменения внешнего магнитного поля при периодическом и импульсном воздействиях.

3.3. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Основные сведения

Сверхпроводимость — состояние материала, для которого характерно полное отсутствие сопротивления постоянному току и магнитного поля в толще сверхпроводника. Возникновение сверхпроводимости происходит при уменьшении температуры ниже определенного для каждого материала значения $T_к$, называемого температурой (точкой) сверхпроводящего перехода или критической температурой. Для некоторых элементов при нормальном давлении критические температуры приведены в табл. 3.4 [3.15], а для некоторых сплавов и химических соединений — в табл. 3.5 [3.14].

Критическая температура зависит от давления и внешнего магнитного поля, технологии изготовления образцов (в пленках она иная), структуры кристаллов и сплавов. Сверхпроводимость отсутствует в чистых металлах, имеющих атомный магнитный порядок, т. е. переходных металлах с незастроенными d- и f-оболочками (Co, Fe, Ni, Gd и др.), — атомный магнетизм и сверхпроводимость являются исключающими друг друга явлениями. Сравнительно мало пока обнаружено сверхпроводников в щелочных, щелочноземельных, благородных металлах, редких землях и актинидах. Высокие температуры сверхпроводящего перехода могут быть у таких химических соединений, компоненты которых имеют низкие $T_к$ или вообще не являются сверхпроводниками. Например, у азота и углерода сверхпроводимость отсутствует, у чистых вольфрама, циркония и молибдена $T_к < 1$ К, а у WC $T_к = 10$ К, у ZrN $T_к = 10{,}7$ К, у MoC $T_к = 14{,}3$ К. Открытие сверхпроводимости в полимере $(SN)_x$ без участия металлических атомов означает начало нового этапа изучения сверхпроводимости. Наиболее высокими сверхпроводящими параметрами обладают сплавы и соединения на основе переходных металлов.

Таблица 3.4. **Температура сверхпроводящего перехода и критическая магнитная индукция для чистых элементов**

Элемент	$T_к$, К	B_0, Тл	Элемент	$T_к$, К	B_0, Тл
Алюминий	1,19	0,0099	Рений	1,7	0,0198
Ванадий	5,3	0,1370	Рутений	0,5	0,0066
Вольфрам	0,012	0,1070	Свинец	7,2	0,0803
Галлий	1,09	0,0051	Тантал	4,39	0,0830
Индий	3,40	0,0293	Торий	1,37	0,0162
Иридий	0,14	0,0020	Титан	0,39	0,0100
Кадмий	0,55	0,0030	Таллий	2,39	0,0171
Ниобий	9,2	0,1944	Цинк	0,9	0,0053
Осмий	0,65	0,0065	Цирконий	0,55	0,0047
Олово-α	3,72	0,0309			

Таблица 3.5 **Критическая температура сплавов и химических соединений**

Соединение	$T_к$, К	Соединение	$T_к$, К
$Nb_{0,75}Zr_{0,25}$	11,0	$Li_{0,1-0,3}\times$	10—13
$Nb_{0,75}Ti_{0,25}$	10,0	$\times Ti_{1,1}S_2$	
Nb_3Sn	18,3	$Pb_{0,92}Mo_6S_7$	15,2
Nb_3Ge	23,2	$LiTi_2O_4$	13,7
$(Hf_{0,5}Zr_{0,5})V_2$	10,1	Mo, N	13—14,8
$NbTc_3$	10,5	$B_5Mo_{1,69}\times$	11,2
$Mo_{0,38}Re_{0,62}$	14,6	$\times Zr_{0,31}$	
$RhZr_2$	11,1	Sn Te	0,02—1,1
$NbRu_3$	15—16	Ge Te	0,06—0,41
Rh Zr_3	11,0	Cr TiO_3	0,03—0,35
NbN	17,3	In Te	1,0—3,5
$(Y_{0,7}Th_{0,3})_2\times$	17,0	Nb Se_2	7,0
$\times C_{3,1}$		Nb S_2	5,4
		$(SN)_x$	0,26

В магнитном поле вещество становится сверхпроводящим при критической температуре T, более низкой, чем $T_к$ (рис. 3.12):

$$B_к \approx B_0\left(1 - T^2/T_к^2\right),$$

где B_0 — критическая магнитная индукция при нулевой температуре; $B_к$ — магнитная индукция, при которой происходит переход из сверхпроводящего состояния в нормальное при температуре $T < T_к$. Значения B_0 приведены в табл. 3.4. Очень тонкая проволока сверхпроводника обладает более высокой критической

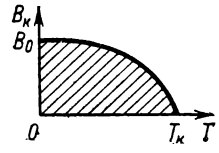


Рис. 3.12. Зависимость критической индукции от температуры. Заштрихована область сверхпроводимости

магнитной индукцией, чем объемный образец. Некоторые сплавы, например ниобий — олово, имеют волокнистую структуру, вследствие чего и в больших образцах материала критическая магнитная индукция высока.

Сверхпроводимость объясняется взаимодействием электрона с решеткой кристалла, при котором возникает межэлектронное притяжение. Оно связано с характером деформации (поляризации) кристаллической решетки электрическим полем движущегося электрона. Как известно из квантовой механики, кристаллическая решетка при температуре $T=0$ К совершает «нулевые» колебания, соответствующие основному состоянию ($n=0$) гармонического осциллятора. Электрон, движущийся в кристалле, нарушает режим этих колебаний и переводит решетку в возбужденное состояние. Обратный переход ее сопровождается излучением энергии, которая поглощается другим электроном. Этот процесс может быть рассмотрен как излучение фонона электроном, движущимся в решетке, с последующим поглощением фонона другим электроном.

Обмен виртуальными фононами согласно квантомеханической теории и создает дополнительное притяжение между электронами. Если это притяжение превысит при низких температурах кулоновское отталкивание электронов, возникает сверхпроводимость. При этом электронная система превращается в связанный коллектив, для возбуждения которого требуется затрата конечной энергии. Возбужденное состояние отделено от основного некоторым энергетическим интервалом, называемым «энергетической щелью» Δ.

Притяжение между электронами будет наиболее сильным, если они обладают противоположными импульсами и спинами. Поэтому электронную систему в сверхпроводнике можно представить состоящей из связанных пар таких электронов, а возбуждение электронной системы — как разрыв такой пары. Электронные пары называют часто куперовскими по имени Купера, показавшего, что основное состояние нормального металла является неустойчивым относительно сколь угодно слабого притяжения между электронами на поверхности Ферми, в результае чего в такой системе электронам энергетически выгодно разбиться на связанные пары с нулевыми суммарными импульсом и спином. Энергетическая щель Δ является мерой связи между электронами пары. Ее размеры составляют около 10 мкм, т. е. примерно в 10^4 раз больше периода решетки (около 0,1 нм).

Сверхпроводимость обусловлена взаимодействием электронов с фононами (решеткой кристалла). Энергия фонона $\hbar\omega$ не может быть сколь угодно большой, так как длина соответствующей акустической волны ограничена в кристалле снизу размером, приблизительно равным периоду решетки. Максимальная энергия фонона соответствует в температурной шкале дебаевской температуре T_D. Поэтому переходить в связанное состояние в сверхпроводнике могут лишь электроны, расположенные вблизи уровня Ферми ($W_F \sim 10^4$ К) в слое толщиной $\hbar\omega \sim 10^2$ К. Из этого следует, что температура сверхпроводящего перехода не может превосходить температуры Дебая, хотя благодаря межэлектронному притяжению $T_к$ оказывается приблизительно на порядок меньше T_D. Для многих элементов хорошо подтверждается экспериментально соотношение для энергетической щели при нулевой температуре $\Delta(0) = 1{,}76\, kT_к$.

При температуре, отличной от абсолютного нуля, хаотическое тепловое движение приводит к возбуждению электронной системы и ослабляет притяжение между электронами. Поэтому энергетическая щель при данной температуре $\Delta(T) \approx \Delta(0)\sqrt{1-T/T_к}$.

Электрическое сопротивление обусловлено диссипативным взаимодействием движущейся электронной системы (тока) с кристаллической решеткой или примесями. При наличии щели в энергетическом спектре квантовые переходы электронной системы не всегда возможны. При малых скоростях своего движения электронная система не возбуждается, что и означает движение «без трения», т. е. отсутствие электрического сопротивления ($\rho=0$). Сверхпроводимость исчезает, если плотность тока превышает некоторое критическое значение.

Электромагнитные свойства сверхпроводников

Одно из наиболее фундаментальных свойств сверхпроводников заключается в том, что магнитное поле не проникает в его толщу (эффект Мейсснера). Это соответствует нулевой относительной магнитной проницаемости ($\mu_r=0$) и идеальному диамагнетизму ($\varkappa=-1$). Нулевое значение индукции в толще сверхпроводящего образца является результатом того, что во внешнем магнитном поле на его поверхности возникает стационарный электрический ток, собственное магнитное поле которого противоположно внешнему полю и полностью его компенсирует внутри образца. Поверхностный слой сверхпроводника (обычно несколько десятков нанометров) обладает особыми свойствами, связанными с отличной от нуля напряженностью магнитного поля и экранирующими незатухающими токами.

Существенная особенность электродинамики сверхпроводников заключена в нелокальном характере связи плотности тока с внешним полем. Это обусловлено тем, что электроны в сверхпроводнике пространственно связаны, коррелированы друг с другом. Если поле изменяет состояние одного электрона, то это благодаря межэлектронному взаимодействию влияет на поведение другого электрона. Вследствие нелокального характера электродинамики сверхпроводящего состояния ток в какой-либо точке зависит не от напряженности поля в этой точке, а определяется в общем случае состоянием поля в ее окрестности, т. е. связь между током и полем носит интегральный характер.

Связь между током и напряженностью поля становится локальной, если напряженность поля изменяется медленно, например когда глубина проникновения поля δ в сверхпроводник (поверхностный слой) велика по сравнению с размером куперовской пары ξ_0. В этом случае плотность тока $\boldsymbol{J}=\alpha\boldsymbol{A}$, где $\boldsymbol{A}$ — векторный потенциал, определяемый из соотношения $\boldsymbol{H}=\operatorname{rot}\boldsymbol{A}$. Тогда из уравнения Максвелла $\boldsymbol{J}=\operatorname{rot}\boldsymbol{H}$ зависимость магнитного поля от ко-

ординат будет описываться дифференциальным уравнением $\nabla^2 H - \alpha H = 0$, решение которого для плоской границы сверхпроводника и вакуума дает экспоненциальный закон изменения магнитного поля в поверхностном слое $H(x) = H(0)e^{-x/\lambda}$, где $\lambda = \alpha^{-1/2}$ — глубина проникновения. Она близка к $5 \cdot 10^{-6}$ см.

Возбужденный в сверхпроводящем кольце ток становится незатухающим. Это является следствием не только отсутствия сопротивления (и тепловых потерь), но и квантовой природы явления, когда при определенных значениях тока исчезает излучение и орбиты электронов становятся устойчивыми. Из правила квантования Бора—Зоммерфельда для куперовской пары, движущейся в сверхпроводнике, следует, что связанный с ней магнитный поток оказывается квантовым. Квант магнитного потока или «флюксоид» $\Phi_0 = h/2e = 2 \cdot 10^{-15}$ Вб.

Сверхпроводники с одной определенной температурой перехода в сверхпроводящее состояние называют *сверхпроводниками I рода*. У них глубина поверхностного слоя δ меньше размера куперовской пары ($\delta < \xi_0$). К этой группе относятся все чистые сверхпроводящие металлы, за исключением Nb. Они обладают низкими значениями критических магнитных индукций $B_к$, выше которых сверхпроводимость разрушается. Это препятствует их использованию в качестве соленоидов для создания сверхсильных магнитных полей.

Ко второй группе относятся *сверхпроводники II рода*, которые находятся в сверхпроводящем состоянии второго рода в интервале температур между нижним и верхним критическими значениями. У них глубина проникновения больше корреляционной длины ($\delta > \xi$). Чистый металл можно превратить в вещество второй группы путем введения точечных примесей или использования в виде тонких пленок. Здесь соударения электронов с примесями или границами пленок нарушают связь, образующую куперовскую пару, и уменьшают корреляционную длину $\xi < \xi_0$, поскольку $\xi^{-1} = \xi_0^{-1} + l^{-1}$ (l — длина свободного пробега электрона). Своеобразие электромагнитных свойств сверхпроводников второго рода приводит к тому, что в них существуют два значения критического поля.

Если магнитная индукция во внешнем поле начинает превосходить значение нижней критической магнитной индукции, происходит частичное проникновение магнитного поля во всю толщину сверхпроводящего образца. При этом под действием силы Лоренца электроны в сверхпроводнике двигаются по окружностям, образуя вихри («абрикосовские вихри»). Внутри вихря скорость возрастает по мере приближения к оси, пока не достигнет критического значения и не произойдет «срыв» сверхпроводимости. После этого сверхпроводящий образец оказывается пронизанным нитями из обычных, несверхпроводящих областей, ориентированных в направлении линий магнитного поля. Магнитный поток, пронизывающий сечение вихря, один и тот же для всех вихрей и равен кванту магнитного потока. В виде таких отдельных порций магнитное поле проникает внутрь сверхпроводника. Такое состояние называется «смешанным» или «шубниковской фазой», поскольку Л. В. Шубников еще в конце 30-х годов высказал предположение о существовании сверхпроводимости II рода (теоретический анализ на основе уравнений Гинзбурга — Ландау принадлежит А. А. Абрикосову). Сверхпроводник в шубниковской фазе способен выдержать сильные магнитные поля.

По мере увеличения магнитного поля происходят увеличение и сближение вихревых нитей, пока расстояние между ними не станет равным примерно 10^{-4} см и сверхпроводимость полностью не разрушится. Соответствующая магнитная индукция называется верхней критической магнитной индукцией.

Если сквозь образец с шубниковской фазой пропустить поперек магнитного поля ток (он называется «транспортным током»), этот ток будет взаимодействовать с магнитным полем, проникшим в область вихревых нитей. Под действием силы Лоренца вихри начнут двигаться, что вызывает потери или диссипацию энергии. При движении несверхпроводящей фазы (в области вихря) сквозь кристаллическую решетку будет происходить, в частности, рассеяние электронов тепловыми колебаниями решетки, т. е. обычный механизм электрического сопротивления. Таким образом, появление транспортного тока в сверхпроводнике, находящемся в смешанном состоянии, сопровождается выделением теплоты, что означает нулевое значение критического тока, разрушающего сверхпроводимость.

К последней группе относятся *сверхпроводники III рода*, называемые также жесткими или неидеальными сверхпроводниками II рода в отличие от рассмотренных выше идеальных сверхпроводников II рода. Материалы этой группы содержат крупные неоднородности, возникающие при выделении другой фазы или пластическом деформировании.

Характерной особенностью таких сверхпроводников является явление «пиннинга» (от слова «pinning» — закрепление), т. е. притягивание вихревых нитей к неоднородностям и закрепление на них. Благодаря этому слабый транспортный ток не в состоянии оторвать абрикосовский вихрь от неоднородностей и вызвать его движение, т. е. тепловые потери. Вихри приходят в движение только в том случае, если воздействие силы Лоренца оказывается достаточным для того, чтобы преодолеть пиннинг и оторвать вихрь от неоднородности. Следовательно, после превышения транспортным током соответствующего критического значения и срыва вихрей с неоднородностей выделяется энергия и сверхпроводимость исчезает. Критический ток зависит от масштаба неоднородностей, температуры и уровня внешнего магнитного поля.

Сверхпроводники III рода, сохраняя преимущество сверхпроводников II рода (способность выдерживать сильные магнитные поля), устраняют их основной недостаток (нулевой критический ток). Неоднородности их структуры позволяют пропускать большие токи. Проволока из соединения ниобия с оловом (Nb_3Sn) позволяет пропускать ток с плотностью выше 10^5 А/см^2 в полях с индукциями около 10 Тл. Верхнее значение критической индукции соединения $PbMe_6O_8$ достигает 50 Тл (в качестве Me используются атомы Sn, Cu,

Ag и др., окруженные восемью атомами кислорода).

При переменном токе или при пульсациях внешнего магнитного поля происходят циклические изменения магнитной индукции внутри сверхпроводника, приводящие к диссипации энергии. При частотах, не превышающих десятка килогерц, потери носят гистерезисный характер, определяемый амплитудным значением, и не зависят от формы тока. Критическая плотность переменного тока на частотах 10—100 Гц мало зависит от частоты и по порядку значений ее амплитуды соответствует критическим значениям плотности постоянного тока. С дальнейшим повышением частоты критическая плотность переменного тока падает и может стать более чем на два порядка ниже критической плотности постоянного тока.

Одно из важнейших достижений сверхпроводниковой техники — это создание сверхсильных магнитных полей, причем в достаточно большой области пространства. Современные сверхпроводящие соленоиды позволяют получать поля с магнитной индукцией около 20 Тл. Затраты энергии на охлаждение (получение жидкого гелия) при этом могут быть в 1000 раз меньше энергии, требуемой для питания обычного электромагнита.

Применение сверхпроводящих обмоток в трансформаторах и электрических машинах открывает возможность почти полностью устранить в них тепловые потери, сделать их значительно более компактными и увеличить единичные мощности. Одной из причин этого является возможность отказаться от применения стали, поскольку создаваемые сверхпроводниками магнитные поля намного превосходят их уровень в стальных ферромагнитных материалах. Компактность и экономия массы особенно существенны при создании магнитных систем космических кораблей, в частности для защиты их от радиации.

Ведется инженерная проработка сверхпроводящих кабелей для мощных линий передачи энергии (см. разд. 33). Использование сверхпроводящего состояния объемного резонатора позволяет поднять его добротность более чем на четыре порядка. На частоте 10^{10} Гц достигнута добротность $4\cdot10^8$.

Эффект механического отталкивания сверхпроводника, окруженного магнитной «подушкой», используется для создания опор без трения и электрических вращающихся машин с КПД, равным почти 100 %. Принцип «сверхпроводящего подвеса» (левитации) может быть использован как в гироскопах, так и в поездах сверхскоростной железной дороги. Использованием нескольких вложенных друг в друга сверхпроводящих цилиндров можно добиться того, что во внутреннем цилиндре не будет содержаться ни одного кванта магнитного потока, т. е. добиться идеального магнитного экранирования.

Слабосвязанные сверхпроводники

Система из двух сверхпроводников, разделенных тонким изолирующим слоем с толщиной, меньшей корреляционной длины, называется слабосвязанными сверхпроводниками. Сверхпроводящий ток через разделяющий их слой связан с туннелированием куперовских пар. Переход их с поверхности Ферми одного сверхпроводника на поверхность Ферми другого не сопровождается изменением энергии и не требует энергии на разрыв пар, т. е. сверхпроводящий туннельный ток может возникнуть и при равной нулю разности потенциалов между сверхпроводниками. В этом проявляется качественное отличие данного явления от туннелирования через потенциальный барьер между двумя сверхпроводниками нормальных электронов.

Количественный анализ связанных с этим явлений может быть получен путем распространения метода связанных мод на квантовые состояния куперовских пар. При этом учитывают, что скорость изменения волновой функции на одной стороне перехода зависит от мгновенных значений волновых функций по обе стороны перехода: $j\hbar\,\partial\Psi_1/\partial t=\mathscr{E}_1\Psi_1+K\Psi_2$; $j\hbar\,\partial\Psi_2/\partial t=\mathscr{E}_2\Psi_2+K\Psi_1$, где K — матричный элемент связи между волновыми функциями системы, а $\Psi_1=\sqrt{n_1}e^{j\theta_1}$ и $\Psi_2=\sqrt{n_2}e^{j\theta_2}$ — волновые функции, описывающие макроскопическое состояние двух когерентных ансамблей связанных (сверхпроводящих) электронных пар с плотностями n_1 и n_2 (θ_1 и θ_2 — фазы волновых функций).

Учитывая, что напряжение на ионизирующей прослойке $u=(\mathscr{E}_1-\mathscr{E}_2)/2e$ и разность фаз $\varphi=\theta_2-\theta_1$, из приведенных выше уравнений при $n_1=n_2=n_s$ можно получить

$$\frac{\partial n_1}{\partial t}=-\frac{\partial n_2}{\partial t}=\frac{2K}{\hbar}n_s\sin\varphi \text{ и}$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}=\frac{2e}{\hbar}u=2\pi\frac{u}{\Phi_0},$$

где $\Phi_0=h/2e$ — квант магнитного потока. При постоянном напряжении $u(t)=U$ из последних уравнений $\varphi=2\pi Ut/\Phi_0+\varphi_0$ и сверхпроводящий туннельный ток $i_s=2e\dfrac{\partial n_1}{\partial t}S=I_m\sin(\omega t+\varphi_0)$, где S — площадь диэлектрической прослойки, $I_m=4en_sKS/\hbar$ и φ_0 — постоянная интегрирования.

Из полученных выражений следует, что, действительно, постоянный туннельный ток связанных пар $I_s=I_m\sin\varphi_0$ может возникнуть и при отсутствии напряжения на изолирующем барьере ($U=0$). Это явление получило название стационарного эффекта Джозефсона.

При постоянном напряжении на контакте U в нем возникает переменный ток, частота которого $\omega=2\pi U/\Phi_c$. Это явление получило название нестационарного эффекта Джозефсона. Благодаря этому явлению туннельный переход может служить источником, генератором электромагнитного излучения с частотой, управляемой в широких пределах напряжением.

Магнитное поле в области контакта влияет на разность фаз волновых функций слабосвязанных сверхпроводников, а следовательно, и на ток в контакте. Максимальное значение сверхпроводящего туннельного тока

$$I_{\max}=I_m\frac{\sin(\pi\Phi_K/\Phi_0)}{\pi\Phi_K/\Phi_0},$$

где $\Phi_к$ — магнитный поток в области контакта.

Влияние внешнего магнитного поля на туннельный ток может быть существенно усилено, если использовать интерференцию волн де Бройля куперовских пар в сверхпроводящем кольце, содержащем два последовательных симметрично расположенных туннельных контакта. Сверхпроводящее кольцо включено в цепь внешнего (управляющего) тока, разделяющегося поровну между двумя туннельными переходами и изменяющего фазы в области сверхпроводящего контакта. Максимальное значение этого тока, при котором еще возможно сверхпроводящее туннелирование, $I_{max} \approx \approx I_0 \cos(\pi\Phi/\Phi_0)$ определяется магнитным потоком Φ, пронизывающим сверхпроводящее кольцо. Рассмотренное устройство получило название сверхпроводящего квантового интерферометра.

Рассмотренные выше явления лежат в основе работы различного вида сверхпроводниковых магнитометров и градиентометров уникальной чувствительности.

Туннельная система сверхпроводник—диэлектрик—сверхпроводник представляет собой один из многих типов слабосвязанных сверхпроводников, общим признаком которых является наличие неоднородной сверхпроводящей структуры, содержащей в направлении тока короткую область с подавленной сверхпроводимостью. Например, в точечном контакте и мостике переменной толщины подавление сверхпроводимости происходит в результате превышения локальной плотностью тока своего критического значения. В пленке сверхпроводника с нанесенной на нее узкой полоской нормального металла подавление сверхпроводимости обусловлено эффектом близости.

3.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОВОДЯЩЕЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ СРЕДЕ

При движении проводящей среды в магнитном поле возникает сила Лоренца, обусловливающая соответствующие ЭДС и ток. Их возникновение и взаимодействие с электромагнитным полем относятся к той области явлений, которая получила название магнитогидродинамики. При этом предполагается, что число заряженных частиц в системе столь велико, что ее поведение допускает макроскопическое описание с помощью таких понятий, как плотность тока, проводимость, плотность массы и т. д. Движение системы носителей заряда при этом можно рассматривать как движение жидкости с определенными электрическими и магнитными свойствами.

Уравнения магнитогидродинамики

Сложная картина взаимодействия электромагнитных и гидродинамических явлений описывается на основе совместного решения уравнений электромагнитного поля и уравнений движения жидкости.

Гидродинамические уравнения включают:

уравнение непрерывности или сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \boldsymbol{v}) = 0;$$

уравнение движения (Навье—Стокса)

$$\rho \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} + \rho \boldsymbol{v} \nabla \boldsymbol{v} = -\operatorname{grad} p + \boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B} + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{\eta}{3}\right) \operatorname{grad} \operatorname{div} \boldsymbol{v};$$

уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho w + \frac{\boldsymbol{ED}}{2} + \frac{\boldsymbol{BH}}{2}\right) + \frac{J^2}{\sigma} - \boldsymbol{JE}_{\text{стор}} = -\operatorname{div}\left(\boldsymbol{v}\frac{\rho v^2}{2} + \boldsymbol{v}\rho w + \boldsymbol{v}\rho - \boldsymbol{v}\sigma'_{ik} - \varkappa \Delta T + \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}\right),$$

где $\underline{v}$ — скорость; ρ — плотность вещества; p — давление; η и ζ — первый и второй коэффициенты вязкости; $\varkappa$ — коэффициент теплопроводности; w — внутренняя энергия единицы массы и σ'_{ik} — тензор вязких напряжений

$$\sigma'_{ik} = \eta\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial v_l}{\partial x_l}\right) + \zeta \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l}.$$

Электродинамические уравнения используют в виде

$$\operatorname{div} \boldsymbol{B} = 0;$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = \operatorname{rot}\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{B} + \frac{1}{\sigma\mu_0}\nabla^2 \boldsymbol{B},$$

где σ — удельная электрическая проводимость.

Последнее уравнение есть результат исключения из уравнений Максвелла напряженности электрического поля в движущейся среде, где плотность тока $\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E}' = \sigma(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})$. При этом предполагается, что относительная магнитная проницаемость среды мало отличается от единицы, а электрическая проводимость постоянна — не зависит ни от времени, ни от координат, ни от магнитного поля (это не соблюдается в слишком разреженной среде и сильном магнитном поле).

«Вмороженность» и «диффузия» магнитного поля

Наглядное истолкование может быть дано последнему уравнению в предельном случае достаточно больших проводимостей, когда

$$\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = \operatorname{rot}\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}.$$

Это означает, что при перемещении какого-либо замкнутого «жидкого контура» в идеально проводящей среде он не будет пересекать магнитных линий. Действительно, изменение во времени магнитного потока, который пронизывает контур, перемещающийся с окружающей средой, определяется изменением ин-

дукции во времени и пересечением этим контуром магнитных линий:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \int \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}\, d\boldsymbol{S} + \int \boldsymbol{B} \times \boldsymbol{v}\, d\boldsymbol{l} =$$

$$= \int \left(\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} - \operatorname{rot} \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \right) d\boldsymbol{S} = 0.$$

То, что магнитный поток через всякую поверхность, опирающуюся на «жидкий контур», остается неизменным, означает, что магнитные линии как бы «приклеены» или «вморожены» в вещество и перемещаются вместе с ним.

Условие «вмороженности» означает, что при движении среды поперек магнитного поля в ней индуцируются токи, поле которых, складываясь с первоначальным, так изменяет его, что магнитные линии смещаются вслед за средой. Поэтому движение среды вдоль линий не вызывает ЭДС.

Вмороженность приводит к тому, что поле усиливается при сжатии проводящей среды и ослабляется при ее расширении. Усиление и расширение поля не связаны с увеличением потока, поэтому они происходят почти безынерционного и не имеют ничего общего с изменениями поля под действием сторонних источников тока. Сохранение потока может объяснить происхождение магнитного поля звезд после сжатия газа со слабым полем. Подобное явление может быть использовано для образования больших, но кратковременных магнитных полей в земных условиях. В одном из экспериментов первоначальное магнитное поле с напряженностью 4—8 МА/м образовалось внутри медного цилиндра от разряда конденсаторной батареи на соленоид. Одновременно ударная волна от детонации окружающего взрывчатого вещества сминала цилиндр и вмороженное в него магнитное поле. В процессе сжатия в течение около 2 мкс удавалось получить поле с напряженностью 1,1 ГА/м. Принцип сжатия вмороженного в жидкий металл магнитного поля применяется и в гидромагнитах.

Аналогия между распространением магнитного поля в проводящей среде и явлением диффузии наиболее отчетливо можно проследить в другом частном случае, когда среда неподвижна и

$$\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma \mu_0} \nabla^2 \boldsymbol{B}.$$

Сравнение этого уравнения с уравнением диффузии $\partial p/\partial t = D\nabla^2 p$ показывает, что проникновение электромагнитного поля в неподвижный проводник происходит по таким же законам, как изменение давления газа в процессе диффузии.

Своеобразным коэффициентом диффузии магнитного поля является величина $1/\sigma\mu_0$ — аналог коэффициента D. С ошибкой менее 5 % можно считать, что расстояние половинного затухания поля, играющее роль глубины проникновения, $\delta \approx \sqrt{t/\sigma\mu_0}$, где t — время наблюдения (время диффузии). Явление вмороженности магнитных линий не является специфически магнитогидродинамическим явлением, поскольку оно может быть сведено к малой глубине диффузии магнитного поля на поверхности покоящегося проводника.

Магнитное давление, электромагнитные насосы и ускорители

В гидродинамическом уравнении движения специфику магнитогидродинамики выражает $\boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B}$ в правой части. Именно оно выражает ту дополнительную силу, которая определяется магнитным полем. Пользуясь первым уравнением Максвелла и формулами векторного анализа, можно записать:

$$\boldsymbol{J} \cdot \boldsymbol{B} = -\frac{1}{\mu_0} \boldsymbol{B} \cdot \operatorname{rot} \boldsymbol{B} = -\operatorname{grad} w_м + \frac{1}{\mu_0} (\boldsymbol{B}\nabla)\, \boldsymbol{B},$$

где $w_м = B^2/2\mu_0 = HB/2$.

Сравнивая последнюю формулу с уравнением сил, нетрудно видеть, что в нем объемная плотность магнитной энергии $w_м$ может рассматриваться как магнитное давление $p_B = w_м$. Наиболее отчетливо это проявляется в тех простых геометрических конфигурациях, где поле однородное и второй член в последней формуле исчезает. Тогда (и только тогда) магнитная сила определяется выражением $\boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B} = -\operatorname{grad} p_B$.

Для этих условий из уравнения движения следует $p + p_B = 0$, т. е любое изменение механического давления жидкости или плазмы должно компенсироваться противоположным изменением магнитного давления p_B.

Существование магнитного давления делает возможной работу разнообразных магнитных насосов и ловушек. В исследовании управляемых термоядерных реакций магнитное поле используется для изоляции плазмы, нагретой до миллионов кельвинов, от стенок заключающего ее сосуда. Размеры плазменного канала с током определяются сжимающим действием магнитного давления (пинч-эффект), уравновешивающего давление раскаленной плазмы. Правда, в таких установках магнитное давление является источником нестабильностей, вызванных локальными сжатиями и изгибами плазмы с током.

Магнитное давление может быть использовано помимо удержания плазмы также для разгона ее до больших скоростей. В обоих случаях магнитные поля могут создаваться токами либо во внешних проводниках, либо в самой плазме. Те же принципы применяются в электромагнитных насосах, служащих для перекачки расплавленных металлов. Простейшим устройством этого рода является *кондукционный электромагнитный насос.*

В насосе канал с проводящей жидкостью помещен между полюсами магнита. Электроды, расположенные в канале, позволяют пропускать ток через жидкость поперек канала и магнитного поля. Сила, возникающая при взаимодействии тока и поля, составляет поток жидкости двигаться по каналу. Ток возбуждается внешним электрическим полем и является током проводимости или, как говорят иногда, током кондукции, почему насос и называют кондукционным.

Электромагнитные насосы, в которых ток не подводится через электроды, а возбуждается (индуцируется) переменными магнитными полями, называют *индукционными насосами.*

Наибольшее распространение получили МГД-насосы с линейным плоским или цилиндрическим каналом и машины с винтовым каналом.

Жидкометаллические насосы начали находить применение вначале в связи с развитием реакторов на быстрых нейтронах. В таких реакторах МГД-машины используются в качестве насосов для перекачивания лития, калия и натрия при высоких температурах. По сравнению с механическими насосами их преимуществом является отсутствие движущихся механических частей, уплотнений, сложных подшипниковых узлов и т. п., что приводит к увеличению надежности и простоте обслуживания. Электромагнитные насосы с мощностью до нескольких сот киловатт полностью вытеснили механические насосы из вспомогательных систем ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Намечается широкое применение электромагнитных насосов в основных контурах станций с реакторами на быстрых нейтронах. Все шире такие насосы и другие типы МГД-устройств (перемешиватели, лотки, дроссели, дозаторы) используются в металлургии, литейном производстве, химической промышленности и т. п., позволяя механизировать и автоматизировать многие тяжелые производственные операции с жидким алюминием, цинком, свинцом, ртутью, чугуном и сталью.

Свободное парение проводящего тела в переменном магнитном поле можно также рассматривать как своеобразный критический режим электромагнитного насоса. Подвеска алюминиевого тела без подшипников при помощи переменного магнитного поля может найти применение в расходомере, подвешенном в потоке жидкости или газе. Но наиболее важное применение это явление нашло в «электромагнитном тигле», который позволяет плавить сверхчистые тугоплавкие металлы, весьма активные при высоких температурах, без соприкосновения с какими-либо огнеупорными материалами.

Ускорение плазмы по схеме кондукционного насоса называют ускорением в скрещенных полях. Ускорение по схеме индукционного насоса лежит в основе асинхронного плазменного двигателя. В обоих случаях магнитные поля создаются токами в специальных обмотках. Известны также «рельсовые схемы», в которых плазма ускоряется между двумя параллельными прямыми металлическими проводниками («рельсами») с токами, замыкающимися через плазму. Симметричное магнитное поле самой плазмы только сжимает токовый шнур. Виток, образованный рельсами и плазмой, приводит к концентрации магнитного поля с одной стороны проводящего газа. Возникающее избыточное магнитное давление толкает плазму вдоль проводов. Для впрыскивания плазмы в магнитные ловушки сконструированы плазменные пушки, основанные на том же принципе и имеющие более удобную коаксиальную конструкцию, в которой каналом служит кольцевая щель между двумя параллельными цилиндрами. В этот промежуток и подается плазма быстродействующим клапаном. Радиальный ток в плазме, взаимодействуя с коаксиальным магнитным полем этого же тока, выталкивает плазму из пушки.

Приборы для ускорения плазмы аналогичны электродвигателю. По принципу действия двигателя постоянного тока происходит ускорение в скрещенных полях, по принципу действия асинхронного двигателя — бегущим полем. Электрический двигатель можно превратить в генератор. С плазменным двигателем можно сделать то же самое, если его заставить не ускорять, а тормозить плазму. При этом кинетическая энергия плазменного потока будет преобразовываться в электрическую. Получается плазменный генератор или, как его называют, магнитогидродинамический генератор. Аналогичный принцип используют жидкометаллические МГД-генераторы.

3.5. ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Термоэлектронная эмиссия

Электронной эмиссией называют процесс выхода электронов из материалов.

Термоэлектронная эмиссия — электронная эмиссия, обусловленная нагревом материала, испускающего электроны.

Термоэлектронная эмиссия используется в электровакуумных приборах. Электрод, эмитирующий электроны, называется катодом.

Плотность тока термоэлектронной эмиссии определяется формулой Ричардсона—Дешмана

$$J_э = AT^2 e^{-W_0/kT} = AT^2 e^{-11\,600\varphi/T},$$

где $J_э$ — плотность тока эмиссии, А/м²; T — температура, К; A — постоянная, А/(м²·К²); k — постоянная Больцмана, Дж/К; W_0 — работа выхода электронов (расстояние от вершины потенциального барьера на границе катода до уровня Ферми), Дж; φ — работа выхода, выраженная в вольтах, В.

Значения работы выхода φ и константы A для некоторых материалов приведены в табл. 3.6.

Для изготовления металлических катодов чаще всего используется вольфрам как один из наиболее тугоплавких металлов.

Образование на поверхности металла мономолекулярных пленок некоторых веществ сопровождается поляризацией атомов пленки или их ионизацией и вследствие этого возникновением ускоряющего электрического поля, снижающего работу выхода φ электронов из катода.

Наиболее распространенными в технике пленочными катодами являются катоды из торированных вольфрама и молибдена. Их работа выхода $\varphi = 1{,}5 \div 2{,}6$ В.

Наиболее распространенными в современных электровакуумных приборах являются оксидные катоды, обладающие большой удельной

Таблица 3.6 **Значения работы выхода φ и константы A для некоторых материалов**

Материал	φ, В	A, А/(м²·К²)
Cs	1,89	$162 \cdot 10^4$
Ba	2,29	$60 \cdot 10^4$
Th	3,41	$70 \cdot 10^4$
Mo	4,27	$55 \cdot 10^4$
W	4,54	$75 \cdot 10^4$
Hg	4,52	—

эмиссией, сравнительно низкой рабочей температурой и высокой экономичностью (экономичность катода представляет собой отношение тока эмиссии к мощности накала катода).

В качестве материала основания при изготовлении оксидного катода используется вольфрам или никель. Активный слой представляет собой примесный полупроводник, образованный твердым раствором окислов щелочноземельных металлов (BaO и SrO — двухкомпонентный оксид или BaO, SrO и CaO — трехкомпонентный оксид) с вкраплениями атомов чистого металла (Ba, Sr), представляющих собой донорные примеси, и поверхностным одноатомным слоем Ba.

У хорошо активированных катодов φ составляет 0,95—1,2 В.

Автоэлектронная эмиссия

Автоэлектронной (электростатической) эмиссией называют электронную эмиссию, обусловленную наличием у поверхности катода сильного ускоряющего электроны электрического поля.

При наличии внешнего ускоряющего электрического поля у поверхности катода потенциальный барьер снижается, сужается и электроны просачиваются сквозь потенциальный барьер (туннельный эффект).

Фотоэлектронная эмиссия

Фотоэлектронной эмиссией называют электронную эмиссию с поверхности тел под действием падающего на нее излучения.

Фотоэлектронная эмиссия характеризуется двумя законами:

1) законом Столетова

$$I_\Phi = k\Phi,$$

где I_Φ — ток фотоэлектронной эмиссии; Φ — световой поток (или общий поток излучения); k — коэффициент пропорциональности, называемый чувствительностью фотокатода — спектральной в случае монохроматического излучения или интегральной при неразложенном (белом) излучении;

2) законом Эйнштейна

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{max} = h\nu - e\varphi,$$

где $\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{max}$ — максимальная кинетическая энергия покидающих катод электронов; ν — частота падающего на катод света; φ — работа выхода материала катода, В; $h = 6{,}69 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

Закон Эйнштейна может быть также записан в виде

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{max} = h(\nu - \nu_0),$$

где ν_0 — порог фотолектронной эмиссии, т. е. минимальная частота света, при которой возможна эмиссия с данного катода.

Пороговая частота ν_0 или пороговая длина волны λ_0 связана с работой выхода катода соотношением

$$\nu_0 = e\varphi/h \text{ или } \lambda_0 = 1236/\varphi,$$

где φ, В и λ_0, нм.

В табл. 3.7 приведены значения λ_0 и работы выхода φ для некоторых металлов.

Таблица 3.7. **Значения λ_0 и φ для некоторых металлов**

Металл	λ_0, нм	φ, В	Металл	λ_0, нм	φ, В
Pt	232	5,32	Ba	490	2,29
Ag	278	4,55	Na	525	2,35
Ni	268	4,61	K	550	2,25
Mg	345	3,68	Cs	640	1,93

Зависимость спектральной чувствительности k_ν фотокатода от частоты (или длины волны) падающего света называют спектральной характеристикой катода.

Интегральная чувствительность k фотокатода, измеряемая обычно в мкА/лм, характеризует ток фотоэлектронной эмиссии на единицу светового потока неразложенного (белого) света от стандартного источника света — лампы накаливания с вольфрамовой спиралью при $T = 2850$ К.

У большинства металлов порог фотоэффекта лежит в ультрафиолетовой или коротковолновой части видимого спектра, а интегральная чувствительность их ничтожно мала.

Наиболее распространены в фотоэлектронной технике полупроводниковые фотокатоды.

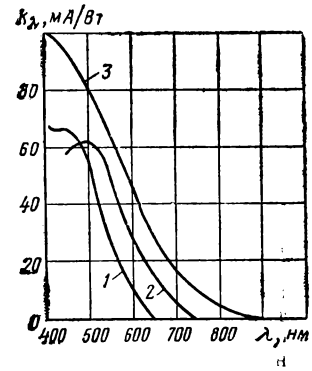


Рис. 3.13. Спектральные характеристики: *1* — сурьмяно-цезиевый катод обычный; *2* — сурьмяно-цезиевый катод, очувствленный кислородом; *3* — многощелочной катод

На рис. 3.13 даны спектральные характеристики обычного и очувствленного кислородом сурьмяно-цезиевого катода и многощелочного катода (Na_2K) Sb—Cs. На рис. 3.14 приведена спектральная характеристика серебряно-кислородно-цезиевого катода.

Полупроводниковые катоды обнаруживают утомление (изменение чувствительности в рабочем режиме) и старение (медленное, не-

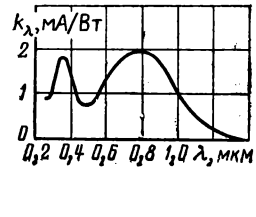


Рис. 3.14. Спектральная характеристика серебряно-кислородно-цезиевого катода

обратимое уменьшение чувствительности со временем).

Наибольшее утомление характерно для серебряно-кислородно-цезиевого катода, меньшее — для сурьмяно-цезиевого катода.

Вторичная электронная эмиссия

Вторичной электронной эмиссией называют процесс выхода электронов из твердых или жидких тел под действием бомбардировки их поверхности первичными электронами. Вторичная эмиссия характеризуется коэффициентом вторичной эмиссии σ:

$$\sigma = \frac{n_2}{n_1} = \frac{I_2}{I_1},$$

где n_2 — число эмиттированных вторичных электронов; n_1 — число пришедших на поверхность первичных электронов; I_2 и I_1 — вторичный и первичный токи.

Значение σ зависит от энергии первичных электронов. С ростом энергии первичных электронов eU_1 оно быстро увеличивается, достигает максимума (σ_{max}) и далее медленно убывает.

У металлов σ_{max} не превышает 1,5, поэтому в приборах, где явление вторичной эмиссии используется для усиления тока (фотоэлектронные умножители и др.), применяются полупроводниковые диноды (вторично-электронные эмиттеры), у которых σ_{max} достигает 10—15.

Вторичная эмиссия под действием положительных ионов, метастабильных атомов и излучения разряда

Электронная эмиссия под действием положительных ионов характеризуется коэффициентом γ_i:

$$\gamma_i = \frac{n_e}{n_i} = \frac{I_e}{I_i},$$

где n_e — число эмиттированных электронов; n_i — число приходящих на катод ионов; I_e и I_i — электронный ток с катода и ионный ток на катод.

В условиях газового разряда на катод приходят и вызывают эмиссию электронов не только положительные ионы, но также метастабильные атомы (возбужденные атомы с относительно большими временами жизни), фотоны излучения разряда, быстрые нейтральные атомы.

В этом случае используется обобщенный коэффициент γ, учитывающий эмиссию электронов под действием этих трех видов частиц в расчете на один приходящий на катод ион.

В газовой среде не все выбиваемые из катода электроны уходят в разрядное пространство из-за частичного отражения от молекул газа и возвращения на катод. Этот эффект тем сильнее, чем больше давление газа p и меньше напряженность электрического поля E у поверхности катода (чем меньше отношение E/p). Вместе с тем при уменьшении E/p возрастает число метастабильных атомов и фотонов, генерируемых в разряде в расчете на один ион, что ведет к увеличению обобщенного коэффициента γ. Совместное действие этих двух эффектов дает сложную зависимость γ от E/p, показанную на рис. 3.15.

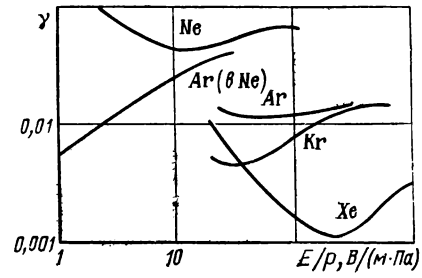


Рис. 3.15. Зависимость обобщенного коэффициента γ от E/p_0 для медного катода в различных газах

3.6. ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ В ВАКУУМЕ И ГАЗАХ

Электрический ток в вакууме

К электронным (высоковакуумным) приборам относятся приборы, в которых степень разрежения газа столь велика, что средняя длина свободного пробега электронов $\bar{\lambda}_e$ много больше расстояния между электродами.

При плоском накаленном катоде, эмиттирующем электроны, и плоском, параллельном катоду аноде связь между плотностью анодного тока J_a, анодным напряжением U_a и расстоянием между электродами d описывается законом степени 3/2

$$J_a = 2{,}33 \cdot 10^{-6} U_a^{3/2}/d^2.$$

Уравнение справедливо до тех пор, пока плотность анодного тока J_a остается меньше плотности тока термоэмиссии катода $J_э$. При дальнейшем увеличении U_a анодный ток в первом приближении остается неизменным (более строго, наблюдается слабый рост тока из-за образования у поверхности катода ускоряющего электрического поля).

При цилиндрическом катоде радиусом $r_к$, окруженного коаксиальным цилиндрическим анодом радиусом r_a, ток в амперах на метр длины анода

$$I_a = 14{,}65 \cdot 10^{-6} U_a^{3/2}/\beta^2 r_a,$$

где β^2 — поправочный коэффициент, зависящий от отношения $r_a/r_к$ и близкий к единице при $r_a/r_к \geqslant 10$.

Столкновение электронов и ионов с атомами и молекулами газа

Движение молекул, а также заряженных частиц (электронов и ионов) в газовой среде зависит от концентрации газа n (числа молекул в 1 м³ газа), которая связана с давлением p, Па, и температурой газа T, К, соотношением

$$n = p/kT = 7{,}24 \cdot 10^{22} p/T.$$

При количественном учете актов столкновений атомов (молекул) газа обычно пользу-

Таблица 38. Значения $\lambda_{м0}$ для некоторых газов при $p=1$ Па, $T=273$ К

Газ	He	Ne	Ar	H_2	N_2	O_2	Пары Na	Пары Hg
$\lambda_{м0}$	$9{,}82\cdot10^{-3}$	$8{,}7\cdot10^{-3}$	$5{,}78\cdot10^{-3}$	$10{,}0\cdot10^{-3}$	$4{,}74\cdot10^{-3}$	$5{,}4\cdot10^{-3}$	$6{,}05\cdot10^{-3}$	$3{,}65\cdot10^{-3}$

ются средней длиной свободного пробега молекул $\lambda_м$:

$$\lambda_м = \frac{1}{\sqrt{2}\,qn}\,\frac{k}{\sqrt{2}\,q}\,\frac{T}{p} = \lambda_{м0}\frac{T}{273p} = \frac{\lambda_{м0}}{p_0},$$

где $\sqrt{2}q$ — газокинетическое сечение молекулы (атома), м^2; $\lambda_{м0}$ — средняя длина свободного пробега молекул при $p=1$ Па и $T=273$ К (табл. 3.8), м; $p_0=p\cdot273/T$ — давление газа, приведенное к 273 К.

При движении электронов в газе средняя длина их свободного пробега λ_e оказывается согласно кинетической теории газа равной:

$$\lambda_e = 4\sqrt{2}\,\lambda_м = 4\sqrt{2}\,\frac{\lambda_{м0}}{p_0} = \frac{\lambda_{e0}}{p_0}.$$

Однако действительное значение λ_e оказывается зависящим также от скорости движения (энергии) электронов.

Столкновения электронов с нейтральными невозбужденными атомами могут быть упругими или неупругими I рода (возбуждение и ионизация атома).

Кинетическая энергия, теряемая электроном и приобретаемая атомом при упругих столкновениях, невелика из-за большой разности масс электрона m_e и атома m_a (доля теряемой в среднем энергии порядка $2m_e/m_a$).

При неупругих столкновениях I рода часть кинетической энергии электрона передается атому в виде энергии его возбуждения или ионизации.

На рис. 3.16 приведена зависимость вероятности ионизации некоторых атомов от энергии электрона, выраженной в вольтах. Минимальная энергия, необходимая для ионизации или возбуждения данного атома, характеризуется соответственно потенциалами ионизации U_i или возбуждения $U_в$ (табл. 3.9).

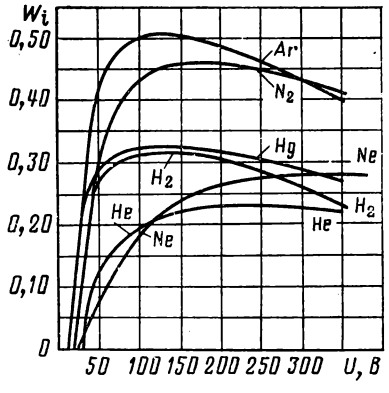


Рис. 3.16. Зависимость вероятности ионизации различных атомов от энергии электронов

Таблица 39. Значения потенциалов ионизации и возбуждения некоторых газов

Газ	H_2	He	Ne	Ar	Kr	Xe
U_i, В	15,4	24,58	21,56	15,75	13,94	12,13
$U_в$, В	10,2	21,2	16,8	11,6	10,02	8,45

Процесс образования нейтрального атома (молекулы) при воссоединении электрона и положительного иона называется электронно-ионной рекомбинацией Электронно-ионная рекомбинация может протекать двояким путем:

1. Рекомбинация в двойном ударе (радиационная) — непосредственное взаимодействие электрона и иона в газовой среде, при котором избыточная энергия выделяется в виде светового кванта. Рекомбинация в двойном ударе имеет место в разряде сравнительно высокого давления при достаточно большом разрядном токе.

В молекулярных газах возможна рекомбинация молекулярного иона с электроном, при которой выделяющаяся энергия идет на диссоциацию молекулы на атомы (диссоциативная рекомбинация). Интенсивность этого процесса велика даже при сравнительно низких давлениях.

2. Рекомбинация в тройном соударении. В этом случае ион сталкивается с электроном в присутствии третьей частицы, которой и передается избыточная энергия. Такой частицей обычно является атом газа, а поэтому интенсивность этого процесса пропорциональна не только концентрациям электронов и ионов, но и концентрации нейтральных атомов газа. Вследствие этого рекомбинация в тройном соударении существенна при весьма высоких давлениях газа.

Частным случаем рекомбинации в тройном соударении является рекомбинация на стенках и электродах. Резко ограниченные возможности перемещения электронов и ионов на этих поверхностях делают вероятность рекомбинации близкой к единице и исчезновение электронов и ионов определяется исключительно условиями их ухода из разряда на эти поверхности. При низких давлениях газа, когда эти условия облегчены, рекомбинация на стенках является основной.

Разновидностью неупругого удара II рода (наряду с процессами рекомбинации) является взаимодействие возбужденного атома с электроном или нейтральным атомом, которым передается энергия возбуждения. При этом происходит безызлучательный переход возбужденного атома в нормальное состояние. Вероятность такого процесса велика для метаста-

бильных атомов, имеющих большое время жизни.

Другим результатом столкновения метастабильного атома с быстрым электроном или световым квантом является переход электрона атома на более высокий уровень возбуждения (ступенчатое возбуждение) или полный отрыв электрона от атома (ступенчатая ионизация).

Эти процессы существенны при достаточных концентрациях возбужденных атомов и электронов, т. е. при достаточно больших (тысячи паскалей) давлениях и больших токах разряда.

Движение электронов и ионов в газе

В заполненном газом пространстве, в котором действует электрическое поле, движение заряженных частиц направленно-беспорядочное.

Во многих случаях электрического разряда в газе распределение электронов по энергиям (скоростям) подчиняется закону Максвелла

$$dn_W = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{n}{(kT_e)^{3/2}} e^{-W/kT_e} \sqrt{W}\, dW,$$

где dn_W — число электронов в данном объеме с энергиями от W до $W+dW$; n — полное число электронов в данном объеме; T_e — температура электронного газа; k — постоянная Больцмана.

В этих случаях беспорядочное движение электронов характеризуется температурой электронного газа T_e.

При этом среднеарифметическая скорость $\bar{v}_e$, среднеквадратическая скорость $\overline{\overline{v}}_e$ и наиболее вероятная скорость v_{e0} беспорядочного движения связаны с T_e соотношениями:

$$\bar{v}_e = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_{e0} = \sqrt{\frac{8}{3\pi}}\, \overline{\overline{v}}_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}.$$

Средняя энергия электронов

$$\frac{m_e v_e^2}{2} = eU_e = \frac{3}{2} kT_e,$$

где U_e соответствует средней энергии электронов, В.

В случае, если в газовом объеме двигаются ионы и их распределение по энергиям соответствует закону Максвелла или не слишком от него отступает, для них могут быть записаны соотношения, аналогичные приведенным для электронного газа.

Направленное движение электронов и положительных ионов под действием силы электрического поля происходит (вследствие «трения» их о частицы газа) с некоторой постоянной средней скоростью $\bar{v}_x$.

Для положительных ионов

$$\bar{v}_{ix} = \mu_i E,$$

где E — напряженность электрического поля.

Коэффициент пропорциональности μ_i называется подвижностью ионов.

Рассмотрение взаимодействия иона и молекулы нейтрального газа как соударения упругих шаров приводит к выражению

$$\mu_i = 0{,}815 \frac{e\lambda_i}{m_i \bar{v}_i} = 0{,}815 \frac{e\lambda_{i0}}{m_i \bar{v}_i} \frac{1}{p_0},$$

где λ_{i0} — средняя длина свободного пробега иона при давлении 1 Па; p_0 — давление газа, Па, приведенное к 273 К; m_i — масса иона; $\bar{v}_i$ — средняя скорость беспорядочного движения ионов, м/с.

Формула дает несколько завышенные значения μ_i, так как не учитывает электрического взаимодействия ионов с атомами (явлений поляризации атомов и перезарядки).

Для случаев, когда существенное влияние оказывает перезарядка,

$$\bar{v}_{ix} = 52 \frac{U_i}{\sqrt{\mu}} \left(\frac{E}{p_0}\right)^{1/2},$$

где U_i — потенциал ионизации газа, В; μ — атомная масса газа.

На рис. 3.17, *а* приведены кривые зависимости v_{ix} от E/p_0 для криптона и ксенона. Пунктиром изображены расчетные зависимости.

Для электронов также используется понятие подвижности μ_e. Однако сложный характер взаимодействия электронов с атомами приводит к тому, что μ_e зависит не только от рода и давления газа, но и от напряженности электрического поля E. На рис. 3.17, *б* приведены кривые зависимости $\bar{v}_{ex}$ от E/p_0 для ряда газов.

Направленное движение заряженных частиц в газе может возникать за счет перепада их концентраций (диффузионное движение). Скорости диффузионного движения при наличии зарядов одного знака (электронов или ионов) выражаются диффузионными уравнениями:

$$\bar{v}_{ex} = -\frac{D_e}{n_e}\frac{dn_e}{dx}; \quad \bar{v}_{ix} = -\frac{D_i}{n_i}\frac{dn_i}{dx},$$

где D_e и D_i — соответственно коэффициенты диффузии электронов и ионов; n_e, n_i — концентрации электронов или ионов в данной точке; dn/dx — градиент концентрации частиц в данной точке.

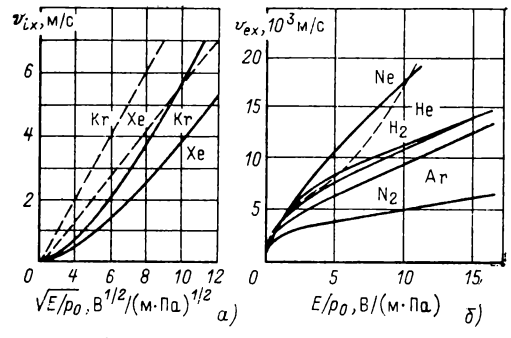


Рис. 3.17. Зависимости скоростей направленного движения.

а — ионов v_{ix} от $\sqrt{E/p_0}$; *б* — электронов v_{ex} от E/p_0

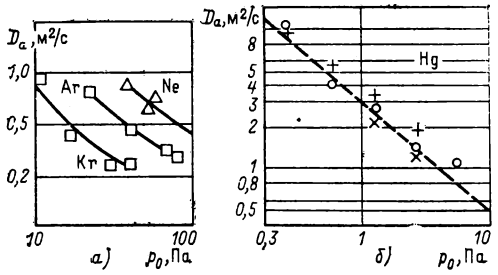


Рис. 3.18. Зависимость коэффициента двухполярной диффузии D_a от давления газа p_0:
а — для инертных газов; *б* — для паров ртути

Коэффициенты диффузии могут быть вычислены по уравнениям:

$$D_e = \mu_e \frac{kT_e}{e} = \mu_e \frac{T_e}{11\,600};$$

$$D_i = \mu_i \frac{kT_i}{e} = \mu_i \frac{T_i}{11\,600}.$$

Когда в газовом объеме имеются заряды двух знаков (электроны и положительные ионы), причем концентрации их равны в каждой точке, имеет место двуполярная диффузия. При этом вследствие электрического взаимодействия между электронами и ионами скорость их диффузионного движения определяется коэффициентом двуполярной диффузии D_a:

$$D_a = \frac{D_e \mu_i + D_i \mu_s}{\mu_i + \mu_e}$$

или приближенно

$$D_a \approx \mu_i \frac{k}{e}(T_e + T_i) = \mu_i \frac{T_e + T_i}{11\,600}.$$

При сравнительно низких давлениях газа $T_i \ll T_e$ и тогда $D_a \approx \mu_i T_e/11\,600$.

На рис. 3.18 приведены кривые зависимости D_a от давления газа p_0 для инертных газов и паров ртути.

3.7. ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ГАЗАХ

Электрические разряды в газе делятся на две группы: несамостоятельные и самостоятельные разряды.

Несамостоятельным разрядом называют электрический разряд, требующий для своего поддержания образования в разрядном промежутке заряженных частиц под действием внешних факторов (внешнего воздействия на газ или электроды, увеличивающего концентрацию заряженных частиц в объеме).

Самостоятельным разрядом называют электрический разряд, существующий под действием приложенного к электродам напряжения и не требующий для своего поддержания образования заряженных частиц за счет действия других внешних факторов.

Если разрядную трубку с двумя плоскими холодными электродами наполнить газом и включить в электрическую цепь, схема которой изображена на рис. 3.19, *а*, то можно снять вольт-амперную характеристику. Участки ее соответствуют следующим видам разряда: *I* — несамостоятельный темный разряд; *II* — самостоятельный темный разряд; *III* — переходная форма разряда от темного к тлеющему; *IV* — нормальный тлеющий разряд; *V* — аномальный тлеющий разряд; *IV* — переходная форма от тлеющего разряда к дуговому; *VII* — дуговой разряд*.

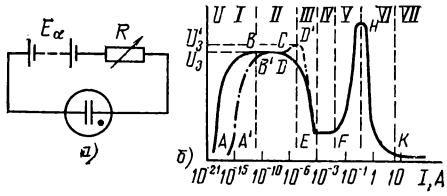


Рис. 3.19. Самостоятельный разряд:
а — схема включения разрядной трубки; *б* — вольт-амперная характеристика самостоятельного разряда

Приведенная на рис. 3.19, *б* вольт-амперная характеристика не включает в себя видов разряда, возникающих при высоких давлениях, а именно искрового, коронного и безэлектродного высокочастотного.

Темный разряд и развитие самостоятельного разряда

При несамостоятельном темном разряде развитие электронных лавин описывается уравнением

$$I_a = I_0 e^{\alpha x_a},$$

где I_a — ток на анод с учетом газового усиления; I_0 — ток электронов с катода; x_a — расстояние между катодом и анодом; α — коэффициент объемной ионизации (число ионизаций, производимых электроном на 1 м пути).

При учете процесса вторичной электронной эмиссии из катода под действием бомбардировки его ионами

$$I_a = I_0 \frac{e^{\alpha x_a}}{1 - \gamma\left(e^{\alpha x_a} - 1\right)},$$

где γ — коэффициент вторичной эмиссии катода под действием ионной бомбардировки.

Значения $\gamma = f(E/p_0)$ приведены в § 3.6 (рис. 3.15). Значения $\alpha/p_0 = f(E/p_0)$ для инертных газов приведены на рис. 3.20.

Условие самостоятельности разряда, полученное Таунсендом, имеет вид:

$$\gamma\left(e^{\alpha x_a} - 1\right) = 1.$$

Из этого выражения следует, что напряжение возникновения самостоятельного разря-

* Интервалы токов даны ориентировочно, так как они могут изменяться в зависимости от рода и давления газа, материала электродов и расстояния между ними.

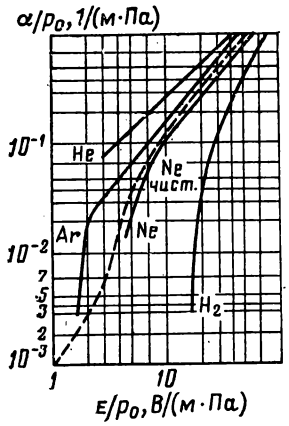


Рис. 3.20. Относительный коэффициент ионизации α/p в функции отношения напряженности поля к давлению газа E/p_0

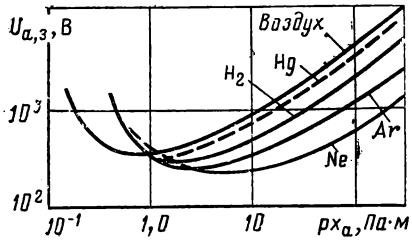


Рис. 3.21. Зависимость напряжения возникновения самостоятельного разряда $U_{а,з}$ от произведения давления газа на расстояние между электродами $px_а$

да $U_{а,з}$ является функцией произведения давления газа p и расстояния между электродами $x_а$. Такие зависимости (кривые Пашена) для разных газов и различных материалов электродов приведены на рис. 3.21.

Тлеющий разряд

На рис. 3.22 показан схематически вид тлеющего разряда, характеризующийся чередованием темных и светящихся слоев газа, носящих названия:

1 — первая катодная темная область; *2* — первое катодное свечение; *3* — вторая катодная темная область; *4* — второе катодное свечение (катодное тлеющее свечение); *5* — фарадеева темная область; *6* — столб разряда; *7* — анодная темная область; *8* — анодное свечение.

Катодное падение потенциала $\Delta U_{к,н}$ при нормальном тлеющем разряде (свечением покрыта только часть поверхности катода) зависит от материала катода и рода газа и не зависит от давления газа и тока.

Ширина $d_{к,н}$ области нормального катодного падения потенциала зависит от материала катода и рода газа. Зависимость от давления газа определяется соотношением $d_{к,н}p_0 = \text{const} = 0{,}15 \div 1{,}0$ м·Па.

Для нормального тлеющего разряда характерна постоянная (нормальная) плотность тока на катоде $J_{к,н}$.

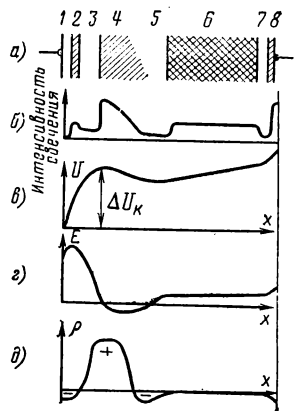


Рис. 3.22. Тлеющий разряд:
а — внешний вид; *б* — распределение интенсивности свечения; *в* — распределение потенциала; *г* — распределение напряженности поля; *д* — распределение объемных зарядов

При изменении давления газа p_0 нормальная плотность тока изменяется по закону

$$i_{к,н} = i_{к,н0}\, p_0^{\alpha},$$

где $J_{к,н0}$ — нормальная плотность тока на катоде при $p = 1$ Па; α — постоянная, зависящая от геометрии электродов и рода газа; $p_0 = p \cdot 273/T$.

При плоских электродах обычно $\alpha \approx 2$ (для Ne $\alpha \approx 1{,}5 \div 1{,}75$).

Когда при увеличении анодного тока вся поверхность катода покрывается свечением, катодное падение потенциала начинает возрастать с увеличением плотности тока. Такое катодное падение потенциала называется аномальным катодным падением потенциала, а сам разряд называется аномальным тлеющим разрядом.

Прикатодные области разряда *1*—*4* (рис. 3.22), в которых сосредоточено катодное падение потенциала, являются жизненно необходимыми для существования тлеющего разряда. Участки *5* (фарадеева темная область) и *6* (столб разряда) являются пассивными участками разряда с хорошей электропроводностью, связывающими анодные области разряда *7* и *8* с катодными областями разряда.

В столбе разряда газ находится в сильно ионизированном состоянии, причем концентрации электронов и ионов примерно равны, т. е. объемный заряд компенсирован. Газ, находящийся в таком состоянии, называется плазмой.

Особенности и характеристики плазмы рассмотрены ниже.

При сближении анода с катодом последовательно сокращаются, а затем исчезают столб разряда, анодная область, фарадеево темное пространство. При вторжении в область тлеющего свечения падение напряжения на приборе резко возрастает (затрудненный разряд).

Дуговой разряд

Понятие дугового разряда охватывает несколько видов разряда, внешним признаком которых является низкое (порядка потенциала ионизации) катодное падение потенциала.

В зависимости от давления газа в разрядном промежутке различают дугу при пониженном давлении и дугу при высоком и сверхвысоком давлениях. Они различаются главным

образом физическими процессами в столбе разряда (плазме).

По виду эмиссии электронов из катода различают:

а) дугу с независимым накалом катода (несамостоятельный дуговой разряд);

б) термоэлектронную дугу;

в) дугу с холодным катодом (с автоэлектронной эмиссией).

Дуга с независимым накалом катода характеризуется двумя режимами горения: когда анодный ток I_a меньше тока термоэлектронной эмиссии катода $I_{э,к}$ и когда $I_a > I_{э,к}$ (за счет дополнительного вырывания электронов из катода электрическим полем). При нормальном режиме горения ($I_a < I_{э,к}$) катодное падение потенциала имеет величину порядка потенциала ионизации газа U_i и практически не зависит от тока I_a. При $I_a > I_{э,к}$ катодное падение потенциала растет с ростом тока.

Термоэлектронная дуга имеет место при катодах из тугоплавких материалов. В результате разогрева катода ионной бомбардировкой на нем появляется раскаленное катодное пятно, являющееся источником электронов. Процессы в столбе термодуги аналогичны процессам в дугах другого вида и столбе тлеющего разряда. Они описаны ниже.

Дуга с холодным катодом возникает при использовании в качестве катода легкоплавких металлов. Наиболее распространенным случаем дуги этого вида является дуга с ртутным катодом, горящая в парах ртути. Эмиссия электронов из ртутного катода концентрируется в одном или нескольких (в зависимости от тока) катодных пятнах. Плотность тока в элементарном катодном пятне достигает 10^{10}—10^{11} А/м^2. При токах более 2—3 А образуется групповое пятно с плотностью тока $2 \cdot 10^7$—$4 \cdot 10^7$ А/м^2. При токах более 30—50 А появляется несколько самостоятельных групповых пятен.

Выделение в катодном пятне энергии, приносимой из разряда ионами, приводит к интенсивному испарению ртути. В результате резко уменьшается длина свободного пробега электронов и ионное облако образуется на очень малых расстояниях от поверхности катода. Это обеспечивает при $\Delta U_к = 10$ В напряженность поля у поверхности катода порядка 10^8 В/м, достаточную для электростатической эмиссии электронов.

Коронный и искровой разряды

Коронный разряд возникает при сравнительно больших давлениях газа и конфигурации электродов, при которой поле в разрядном промежутке очень неравномерно. Ионизация происходит лишь в тонком слое (около электрода с малым радиусом кривизны), называемом коронирующим слоем. На практике чаще всего встречается случай коронирующих цилиндрических проводов. При постоянном напряжении в зависимости от полярности коронирующего электрода различают отрицательную и положительную корону.

При повышении напряжения на коронирующем электроде корона может перейти в дуговой или искровой разряд (при мощности источника, недостаточной для поддержания стационарного дугового разряда). В случае положительной короны переход в искровой разряд происходит при меньшем напряжении, чем в случае отрицательной.

Температура газа в канале искры достигает 10 000 К, что приводит к возможности термической ионизации. Явления искрового разряда не укладываются в теорию лавинных разрядов и находят объяснение в теории стримеров.

Первое условие образования стримеров

$$\frac{\alpha}{p} e^{\frac{\alpha}{p} pd} = 2{,}19 \cdot 10^8 \frac{E_з}{p} \left(\frac{d}{pd}\right)^{1/2} d,$$

где α—коэффициент объемной ионизации, м$^{-1}$; p — давление газа, Па; d — расстояние между электродами, м; E — напряженность поля между электродами, В/м.

Пользуясь этим выражением, можно найти напряжение искрового пробоя:

$$U_з = E_з d.$$

Вычисленные таким образом значения $U_з$ хорошо совпадают с экспериментальными данными при $pd > 250$ м·Па.

Второе условие образования стримеров

$$n_i \geqslant 7 \cdot 10^{20} \text{ ионов/м}^3,$$

где n_i — концентрация ионов в голове лавины.

Для сравнительно коротких искровых промежутков второе условие всегда соблюдается при соблюдении первого.

При искровом пробое разрядного промежутка острие — плоскость напряженности поля, необходимая для пробоя, значительно меньше в случае положительного острия.

В табл. 3.10 приведены значения пробивных напряжений между плоскими электродами в воздухе при атмосферном давлении (10^5 Па) и температуре 293 К.

В высоковольтной технике находят применение газы, электрическая прочность которых в несколько раз превышает электрическую прочность воздуха (азота). В табл. 3.11 приведены данные о двух таких газах.

Таблица 3.10. **Пробивные напряжения между плоскими электродами в воздухе при $p = 10^5$ Па (760 мм рт. ст.) и $T = 293$ К**

d, см	$U_{пр}$, кВ	d, см	$U_{пр}$, кВ	d, см	$U_{пр}$, кВ
1	31,35	5	138,5	12	315,5
2	58,1	6	163,8	14	363,2
3	85,8	8	215,0	16	412,6
4	112,0	10	265,0		

Таблица 3.11. **Данные о плотности, температуре кипения и относительной электрической прочности высокопрочных газов**

Химическая формула	Название	Плотность, кг/м^3	Температура кипения, °С	Относительное пробивное напряжение
N_2	Азот	1,25	—196	1
SF_6	Элегаз	6,7	—64	2,3—2,5
CCl_2F_2	Дихлордифторметан (хладон-12)	6,33	—30	2,4—2,6

Имеется ряд газов, электрическая прочность которых в 6—10 раз превышает прочность воздуха. К ним, в частности, относится четыреххлористый углерод ($U_{пр,отн}=6{,}3$). Однако их практическому использованию препятствуют повышенная химическая активность, токсичность и высокая температура кипения.

Газовая плазма

Газовой плазмой называется сильно ионизированная газовая среда, характеризующаяся почти полным равенством концентраций положительно и отрицательно заряженных частиц. Обычно в плазме беспорядочное движение частиц преобладает над их направленным движением под действием электрического поля или в результате диффузии.

В состоянии плазмы газ находится в столбе и фарадеевой темной области тлеющего и дугового разрядов, высокочастотном разряде, канале искрового разряда, в стволе молнии.

Плазма характеризуется следующими параметрами: n_e, n_i — концентрации электронов и ионов; T_e, T_i, $T_н$ — температуры электронного, ионного и нейтрального газов (атомов или молекул); J_e, J_i — плотности беспорядочных электронного и ионного токов; $J_{eн}$, $J_{iн}$ — плотности направленных электронного и ионного токов; E_l — продольная напряженность электрического поля.

Для средних давлений газа связь между этими параметрами устанавливается с помощью диффузионной теории.

Температура электронного газа T_e может быть найдена из выражения

$$\frac{1}{\sqrt{eU_i/kT_e}}\, e^{\frac{eU_i}{kT_e}} = 1{,}16\cdot 10^5 (Sp_0R)^2,$$

где U_i — потенциал ионизации газа, В; p_0 — давление газа, Па, приведенное к 273 К; R — радиус разрядной трубки, м; $S=\sqrt{\dfrac{a\sqrt{U_i}}{\lambda_{e0}\mu_i}}$ — константа для данного газа (табл. 3.12); λ_{e0} — средняя длина свободного пробега электронов при 1 Па, м; μ_i — подвижность ионов.

Таблица 3.12. **Значения коэффициентов a и S для некоторых газов**

Коэффициент	Ne	Ar	Hg
a, $В^{-1}$	$4{,}5\cdot 10^{-3}$	$12\cdot 10^{-3}$	$14\cdot 10^{-3}$
S, $В^{1/4}С^{1/2}/(Па\cdot м^{3/2})$	$4{,}42\cdot 10^{-3}$	$3{,}97\cdot 10^{-3}$	$8{,}25\cdot 10^{-3}$

На рис. 3.23 приведен универсальный график зависимости температуры электронного газа от произведения Sp_0R.

Продольная напряженность электрического поля в плазме может быть вычислена по формуле

$$E_l = \frac{2{,}4}{R}\sqrt{\frac{D_a U_i}{\mu_e \eta_i}},$$

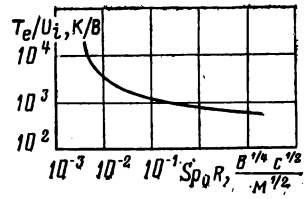


Рис. 3.23. Универсальная зависимость температуры электронного газа T_e от произведения давления газа p_0 на радиус разрядной трубки R (S — постоянная для данного газа)

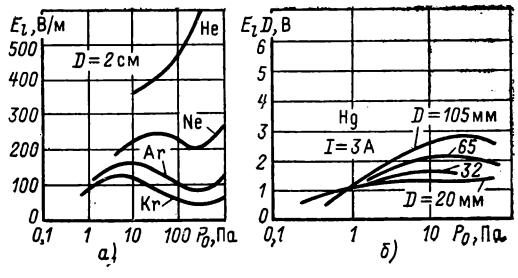


Рис. 3.24. Зависимость продольной напряженности поля E_l в плазме разряда от давления газа: $а$ — в инертных газах при разрядном токе $I_а$=0,3 А и диаметре трубки 2 см; $б$ — в плазме ртутного разряда для различных диаметров разрядной трубки D при токе $I_а$=3 А

где R — радиус разрядной трубки; D_a — коэффициент двуполярной диффузии; U_i — потенциал ионизации; μ_e — подвижность электронов; η_i — доля мощности разряда, расходуемая на ионизацию.

На рис. 3.24, $а$ приведены экспериментальные кривые зависимости продольной напряженности поля E_l от давления газа для инертных газов при диаметре разрядной трубки D=2 см, а на рис. 3.24, $б$ — зависимости E_lD от давления паров ртути.

Распределение концентрации зарядов по сечению разрядной трубки характеризуется формулой

$$n_{er} = n_{e0}\, J_0\left(2{,}4\frac{r}{R}\right),$$

где n_{er} — концентрация зарядов на расстоянии r от оси трубки; $n_{e0}=2{,}3\dfrac{I_а}{e\pi R^2\mu_e E_l}$ — концентрация зарядов на оси; $J_0\left(2{,}4\dfrac{r}{R}\right)$ — функция Бесселя нулевого порядка; R — радиус разрядной трубки. Средняя концентрация зарядов $n_e=n_{e0}/2{,}3$.

Плотности беспорядочного электронного J_e и ионного J_i токов определяются из соотношений

$$J_e = 2{,}48\cdot 10^{-16}\, n_e\sqrt{T_e};$$

$$J_i = 4{,}96\cdot 10^{-16}\, n_i\sqrt{\frac{m_e}{m_i}\,T_i},$$

где n_e и n_i — средние концентрации электронов

и ионов; T_e, T_i — температуры электронного и ионного газов; m_e, m_i — массы электрона и иона.

Соответственно

$$\frac{J_i}{J_e} = 2\sqrt{\frac{T_i m_e}{T_e m_i}}.$$

Плотность направленного электронного тока $J_{eн}$ определяется как

$$J_{eн} = en_e \mu_e E_l = 3{,}8 \cdot 10^{-12} n_e \frac{\lambda_{e0}}{\sqrt{T_e}} \frac{E_l}{p_0}.$$

Экспериментальное исследование параметров плазмы при средних давлениях, результаты которого были приведены выше, проводится по методу зондов Ленгмюра [3.18].

Для плазмы низкого давления диффузионная теория неприменима, и некоторые основные соотношения могут быть получены по теории Ленгмюра и Тонкса [3.18].

Теория плазмы высокого и сверхвысокого давления основана на том факте, что с ростом давления газа средняя кинетическая энергия заряженных частиц приближается к средней кинетической энергии частиц нейтрального газа, т. е. плазма становится по своим свойствам близкой к изотермической плазме ($T_e = T_i = T_н$).

Основными процессами в плазме высокого давления являются термическая ионизация и рекомбинация зарядов в объеме.

Степень ионизации газа характеризуется уравнением Саха

$$\alpha^2 p = AT^{5/2} e^{-\frac{eU_i}{kT}},$$

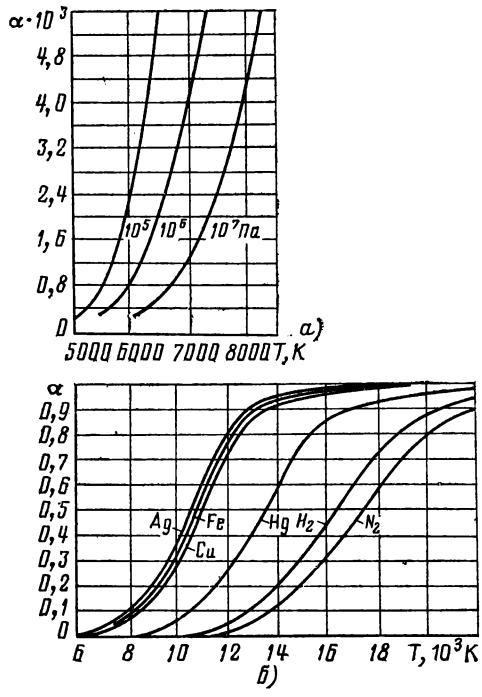


Рис. 3.25. Зависимость степени термической ионизации α от температуры газа:

а — для ртути при разных давлениях; *б* — для паров Ag, Cu, Fe, Hg и газов H_2 и N_2 при $p = 10^5$ Па

где α — степень ионизации ($n_e = n_i = \alpha n$); p — давление газа; $A = 6{,}55 \cdot 10^{-2}$; T — температура газа; U_i — потенциал ионизации газа.

На рис. 3.25 приведены графики зависимости $\alpha = f(T)$.

Внешний вид плазмы высокого давления (например, столба тлеющего или дугового разряда) отличается тем, что она не заполняет всего сечения разрядной трубки, а представляет собой узкий ярко светящийся шнур по оси трубки. Процесс отшнуровывания тем сильнее, чем выше давление и больше плотность тока. Так как в отшнурованном положительном столбе стенки разрядной трубки практически не играют роли, то дуга при атмосферном давлении может гореть на воздухе («дуга Петрова»). Температура шнура в парах ртути оказывается равной 5000—6000 К при давлении 0^5 Па и достигает 8000—10 000 К при давлениях около $250 \cdot 10^5$ Па.

3.8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Поляризация диэлектриков

Основными электрическими процессами, возникающими в диэлектриках под воздействием приложенного напряжения, являются процессы поляризации, электропроводности и пробоя диэлектриков.

Поляризация представляет собой обратимое смещение электрически заряженных частиц, входящих в состав диэлектриков. Различают следующие основные виды поляризации: электронная, ионная, дипольная, спонтанная и некоторые другие.

Процесс поляризации диэлектриков описывается уравнением Клаузиуса—Мосотти

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{n_0 \alpha}{3\varepsilon_0},$$

где ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического материала; n_0 — число частиц (молекул, ионов) в 1 м³ материала; $\alpha = \alpha_э + \alpha_и + \alpha_д$ — поляризуемость частицы (молекулы, иона); $\alpha_э$ — электронная поляризуемость; $\alpha_и$ — ионная поляризуемость; $\alpha_д$ — дипольная поляризуемость; ε_0 — электрическая постоянная.

Уравнение Клаузиуса—Мосотти устанавливает связь между практической характеристикой материала — относительной диэлектрической проницаемостью ε_r, физической постоянной материала α и числом поляризующихся частиц в единице объема диэлектрика n_0.

Поляризованностью P, Кл/м², называется величина

$$P = \varepsilon_0 \chi_r E = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) E,$$

где χ_r — относительная диэлектрическая восприимчивость; E — напряженность электрического поля.

Электронная поляризация представляет собой процесс упругого смещения электронов (электронных орбит) относительно ядра во всех атомах диэлектрика. Процесс электронной поляризации происходит за время 10^{-15}—10^{-16} с. Электронная поляризация имеет место во всех диэлектриках.

Электронная поляризуемость $\alpha_э$ зависит от структуры частицы. Чем больше радиус молекул или иона, тем больше $\alpha_э$ и ε_r данного диэлектрика.

В пропорциональной зависимости от числа частиц n_0 в единице объема диэлектрика находится и ε_r. С нагреванием, когда плотность диэлектрика уменьшается, наблюдается уменьшение ε_r неполярного диэлектрика (рис. 3.26, кривая *1*).

У диэлектриков с чисто электронной поляризацией ε_r численно равна квадрату показателя преломления света.

Ионная поляризация представляет собой упругое смещение под действием электрического поля ионов относительно центров их равновесия. Поляризация ионного смещения происходит за время, сравнимое со временем собственных колебаний ионов, и составляет 10^{-13}—10^{-14} с.

Интенсивность процесса ионной поляризации в уравнении Клаузиуса—Мосотти

$$\alpha_и = 2e^2/b,$$

где e — заряд иона; b — коэффициент упругой связи между ионами.

С повышением температуры ионного диэлектрика $\alpha_и$ возрастает в связи с ослаблением упругих сил в ионном диэлектрике и увеличением амплитуды колебаний иона. Поэтому интенсивность процесса ионной поляризации возрастает с повышением температуры. В ионных диэлектриках одновременно с поляризацией ионного смещения развивается также процесс электронной поляризации. Эффект поляризации у большинства ионных диэлектриков возрастает с повышением их температуры.

Электронная и ионная поляризация — вид деформационной поляризации, не вызывающий потерь энергии в диэлектриках. Процессы поляризации, вызывающие затраты энергии, относятся к релаксационным видам поляризации.

Дипольная поляризация протекает в полярных диэлектриках под действием электрического поля. Этот вид поляризации представляет собой ориентацию — поворот полярных молекул в направлении действующего электрического поля.

Поляризуемость полярных молекул определяется выражением

$$\alpha_д = \mu^2/3kT,$$

где μ — начальный электрический момент полярной молекулы; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

При повышении температуры диэлектрика интенсивность дипольной поляризации возрастает в связи с ослаблением межмолекулярных сил и понижением коэффициента внутреннего трения. Поэтому с повышением температуры вначале ε_r полярных диэлектриков увеличивается (рис. 3.26, кривая *2*). С дальнейшим ростом температуры интенсивность хаотического теплового движения полярных молекул начинает преобладать над ориентирующим действием электрического поля и эффект дипольной поляризации понижается. Это в свою очередь вызывает уменьшение ε_r полярных диэлектриков.

Для ориентации полярных молекул в процессе дипольной поляризации требуются промежутки времени, значительно большие по

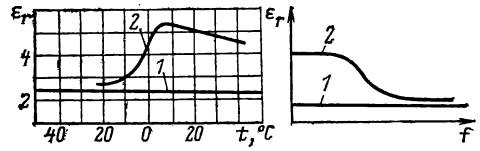


Рис. 3.26. Зависимость ε_r от температуры и частоты для электроизоляционных жидкостей:
1 — неполярная жидкость; *2* — полярная жидкость

сравнению со временем для процессов деформационных поляризаций. Естественно, диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков в сильной степени зависит от частоты электрического поля (рис. 3.26). При низких частотах полярные молекулы успевают совершить свой поворот за время одного полупериода переменного напряжения. При этом ε_r практически равна ε_r при постоянном напряжении. С дальнейшим ростом частоты время одного полупериода сокращается и ряд полярных молекул выпадает из процесса дипольной поляризации. При этом диэлектрическая проницаемость ε_r диэлектрика резко снижается, достигая (при очень больших частотах) значения $\varepsilon_{r\infty}$, обусловленного только электронной поляризацией диэлектрика. Критическая частота f_0, с которой начинается резкое снижение эффекта дипольной поляризации, может быть определена по формуле

$$f_0 = kT/8\pi\eta r^3,$$

где r — эквивалентный радиус модели полярной молекулы; η — динамическая вязкость; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Дипольная поляризация ярко выражена у полярных газов и жидкостей (касторовое масло, совол и др.). В твердых полярных диэлектриках дипольная поляризация представляет собой не ориентацию самих полярных молекул, а поворот имеющихся в молекулах полярных радикалов, например гидроксильных групп в молекулах целлюлозы, бакелита и др. Этот вид дипольной поляризации иногда называется структурной поляризацией [3.21, 3.24].

Значения диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков зависят от размеров полярных молекул и значений их начального электрического момента. Чем меньше размер полярной молекулы — диполя и больше ее начальный момент μ, тем больше ε_r данного диэлектрика. У полярных диэлектриков одновременно имеют место дипольная и электронная поляризации. Вследствие этого суммарный эффект поляризации полярных диэлектриков, а следовательно, и значения их диэлектрических проницаемостей намного выше, чем у неполярных диэлектриков (табл. 3.13).

Дипольная поляризация вызывает потери энергии в диэлектрике, так как электрическое поле затрачивает энергию на поворот полярных молекул (диполей). Эта энергия рассеивается в полярных диэлектриках в виде теплоты, которая вызывает нагрев последних. Потери мощности в диэлектриках, работающих в переменном поле, оцениваются тангенсом угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\gamma}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r},$$

Таблица 3.13. **Относительные диэлектрические проницаемости характерных диэлектриков**

Неполярные диэлектрики		Полярные диэлектрики	
Название	ε_r при 20 °С	Название	ε_r при 20 °С
Четыреххлористый углерод	2,23	Касторовое масло	4,5—4,8
Бензол	2,218	Совол	5,0—5,2
Парафин	2,0—2,2	Бакелит	4—5
Политетрафторэтилен	1,9—2,0	Галовакс	5,0
		Глифталь	8—9

где γ — удельная активная проводимость; ω — угловая частота; ε_0 — электрическая постоянная; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость.

На рис. 3.27 показаны зависимости этой характеристики от температуры для неполярной и полярной жидкостей.

У тщательно очищенных неполярных диэлектриков диэлектрические потери обусловлены преимущественно токами проводимости, величины которых возрастают с повышением температуры диэлектрика. В связи с этим возрастает и tg δ. У полярных диэлектриков наблюдается максимум tg δ при такой вязкости диэлектрика, когда в процессе дипольной поляризации принимает участие наибольшее количество полярных молекул. Понижение tg δ с дальнейшим повышением температуры обусловлено ростом интенсивности беспорядочного теплового движения полярных молекул. Вторичный подъем вызван увеличением тока проводимости в диэлектрике (рис. 3.27).

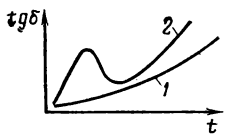


Рис. 3.27. Зависимость tg δ от температуры для электроизоляционных жидкостей: *1* — неполярная жидкость; *2* — полярная жидкость

На рис. 3.28 представлена частотная зависимость tg δ для полярной жидкости. Максимум tg δ здесь соответствует частоте f_0, при которой начинается снижение ε_r (см. рис. 3.26). Это объясняется тем, что большинство полярных молекул при этой частоте выходит из процесса дипольной поляризации.

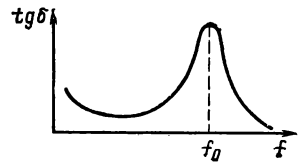


Рис. 3.28. Зависимость tg δ от частоты для полярной электроизоляционной жидкости

Еще один вид релаксационной поляризации наблюдается в неорганических стеклах, а также в ионных кристаллических диэлектриках с неплотной упаковкой ионов (муллит в фарфоре и др.). В этих диэлектриках слабо связанные ионы, находящиеся в состоянии хаотических тепловых колебаний, перебрасываются электрическим полем. Этот процесс получил название *миграционной поляризации*. Переброс слабо связанных ионов вызывает дополнительные потери энергии.

Рис. 3.29. Зависимость ε_r сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля

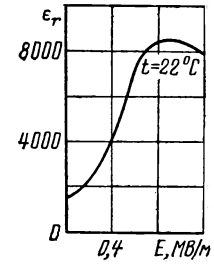
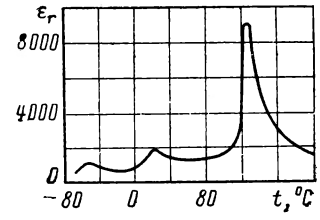


Рис. 3.30. Зависимость ε_r сегнетоэлектрика ($BaTiO_3$) от температуры



Самопроизвольная (спонтанная поляризация) представляет собой процесс самопроизвольной ориентации диполей, наблюдаемой внутри отдельных областей (доменов) диэлектрика в отсутствие электрического поля. Самопроизвольная поляризация имеет место у материалов, называемых сегнетоэлектриками.

В отсутствие электрического поля электрические моменты отдельных областей (доменов) диэлектрика направлены беспорядочно и взаимно уравновешивают друг друга. Наложение на диэлектрик электрического поля вызывает ориентацию диполей в направлении поля. При этом интенсивность поляризации резко возрастает, вследствие чего наблюдается сильный рост диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Этот процесс продолжается до определенной напряженности электрического поля, а затем наступает насыщение (рис. 3.29). Дальнейшее повышение напряженности не увеличивает интенсивности поляризации, и рост ε_r прекращается. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков имеет также ярко выраженный максимум при вполне определенной температуре (рис. 3.30). Эта температура называется сегнетоэлектрической точкой Кюри (Θ_K). Наличие спонтанной поляризации обусловливает аномально большие значения ε_r у сегнетоэлектриков (сегнетова соль, титанат бария и др.). Процесс самопроизвольной поляризации сопровождается затратой энергии, рассеиваемой в диэлектриках в виде теплоты.

Электропроводность диэлектриков

Все диэлектрики, хотя и в незначительной степени, обладают электропроводностью.

В отличие от проводников у диэлектриков наблюдается изменение тока со временем (рис. 3.31) вследствие спадания тока абсорбции. Последний обусловлен наличием релаксационных поляризаций в диэлектрике. С некоторого момента под воздействием постоянного напряжения в диэлектрике устанавливается только ток проводимости. Значение последнего определяет проводимость диэлектрика.

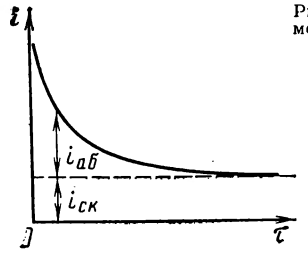


Рис. 3.31. Зависимость тока в диэлектрике от времени

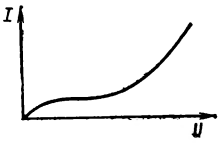


Рис. 3.33. Зависимость тока от напряжения в жидком диэлектрике

В газообразных диэлектриках (воздух, азот, водород и др.) ток проводимости обусловлен направленным перемещением положительно и отрицательно заряженных ионов и электронов.

В жидких диэлектриках ток проводимости создается ионами и электрически заряженными коллоидными частицами (молионы). Источником ионов являются различные примеси в диэлектрике: вода, органические кислоты и т. п. В полярных электроизоляционных жидкостях на ионы могут диссоциировать молекулы самого жидкого диэлектрика. Электропроводность полярных электроизоляционных жидкостей всегда несколько выше электропроводности неполярных жидких диэлектриков.

В электроизоляционных технических жидкостях наблюдается также молионная или электрофоретическая (электрофорез) электропроводность. В этом случае ток проводимости обусловлен направленным перемещением электрически заряженных коллоидных частиц различных примесей: воды, смолистых веществ и др. Коллоидные частицы различных загрязнений перемещаются в электроизоляционной жидкости под действием электрического поля. С повышением температуры жидкого диэлектрика его вязкость падает и направленное перемещение ионов и молионов облегчается. Проводимость жидких диэлектриков изменяется (рис. 3.32) по экспоненциальному закону

$$\gamma = \gamma_0 e^{AT},$$

где γ_0 и A — постоянные величины, зависящие от состава жидкого диэлектрика; T — абсолютная температура.

С ростом напряжения, приложенного к жидкому диэлектрику, изменение тока проводимости (рис. 3.33) носит приблизительно такой же характер, как и у газообразных диэлектриков. В тщательно очищенных электроизоляционных жидкостях отчетливо наблюдается область насыщения. Понижение электропроводности жидких диэлектриков достигается их тщательной очисткой (фильтрование, сушка, обработка адсорбентами и др.).

В твердых диэлектриках электропроводность складывается из ионной и электронной электропроводностей, причем электронная электропроводность, как правило, наблюдается в сильных электрических полях.

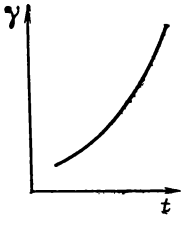


Рис. 3.32. Зависимость удельной проводимости жидкого диэлектрика от температуры

Ток проводимости в твердых диэлектриках обусловливается направленным перемещением ионов примесей и ионов самого диэлектрика. В диэлектриках с атомными и молекулярными решетками ток проводимости обусловлен только ионами различных примесей. У таких диэлектриков (парафин, полиэтилен, политетрафторэтилен и др.) проводимость весьма мала, и эти материалы обладают большими значениями удельного объемного и поверхностного сопротивления: $\rho_V = 10^{15} \div 10^{17}$ Ом·м; $\rho_S = 10^{13} \div 10^{14}$ Ом. Такими же большими удельными сопротивлениями обладают высокополимерные аморфные диэлектрики, например полистирол и полипропилен, у которых ток проводимости обусловлен преимущественно ионами примесей.

С течением времени ионная проводимость твердого диэлектрика понижается в связи с уменьшением ионов примесей, которые, дойдя до электродов, нейтрализуют свои заряды. В ионных кристаллических диэлектриках (слюда и др.) ток проводимости составляют не только ионы примесей, но ионы самой кристаллической решетки. Последние могут быть сорваны электрическим полем с мест, где они были слабо закреплены (междоузлия), а также из узлов кристаллической решетки при одновременном воздействии на нее электрического поля и высокой температуры.

В аморфных диэлектриках (неорганические стекла) ионная электропроводность обусловлена электролизом различных окислов, входящих в состав самих стекол. Особенно сильно повышается электропроводность стекол при содержании в них окислов одновалентных металлов (Na_2O, K_2O и др.). Введение же окислов двухвалентных металлов (BaO, CaO и др.) приводит к снижению проводимости в стеклах.

Проводимость стекол и других твердых диэлектриков показывает заметную зависимость от температуры:

$$\gamma = Ae^{-B/T},$$

где A и B — постоянные, зависящие от состава и структуры твердого диэлектрика; T — абсолютная температура, К.

Проводимость твердых кристаллических диэлектриков с ионными связями хорошо описывается двучленной формулой

$$\gamma = \gamma_1 e^{-B_1/T} + \gamma_2 e^{-B_2/T}.$$

Первый член этой формулы исчезающе мал при низких температурах, а второй — исчезающе мал при высоких температурах.

В ионных кристаллических диэлектриках ток проводимости обусловлен перемещением ионов одного знака. Так, в кристалле NaCl под действием электрического поля движутся только положительно заряженные ионы натрия.

При высоких температурах в токе проводимости принимают участие и ионы другого знака.

В области сильных электрических полей в твердых диэлектриках наблюдается также электронная электропроводность, которая изменяется согласно выражению

$$\gamma = \gamma_н e^{bE},$$

где $\gamma_н$ — проводимость в конце области насыщения; b — коэффициент, зависящий от температуры.

В области очень сильных электрических полей (предпробойная область) электрическая проводимость твердых кристаллических диэлектриков более точно описывается формулой Я. И. Френкеля

$$\gamma = \gamma_н e^{\frac{1}{kT}\sqrt{\frac{e^3E}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}}},$$

где k — постоянная Больцмана; e — заряд электрона; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала; E — напряженность электрического поля.

При высоких температурах может наблюдаться также вхождение электронов в твердый диэлектрик с поверхности металлических электродов.

Пробой диэлектриков

При напряженности электрического поля, превосходящей предел электрической прочности диэлектрика, наступает пробой. Пробой представляет собой процесс разрушения диэлектрика, в результате чего диэлектрик теряет электроизоляционные свойства в месте пробоя.

Напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика, называют пробивным напряжением $U_{пр}$, а соответствующее значение напряженности электрического поля называется электрической прочностью диэлектрика $E_{пр}$.

Для равномерного электрического поля электрическая прочность диэлектрика определяется по формуле

$$E_{пр} = U_{пр}/d,$$

где d — толщина диэлектрика в месте пробоя.

Пробой газообразных диэлектриков см. § 3.7.

Пробой жидких диэлектриков — явление сложное, что объясняется сложным составом жидких диэлектриков и сильным влиянием загрязнений на развитие пробоя. На рис. 3.34 показана зависимость изменения электрической прочности трансформаторного масла от содержания влаги. Наиболее резкое снижение электрической прочности жидких диэлектриков вызывает эмульсионная вода. С повышением температуры эмульсионная вода переходит в растворенную; при этом жидкий диэлектрик становится более однородным и электрическая прочность его повышается.

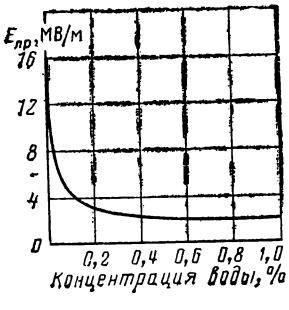


Рис. 3.34. Изменение электрической прочности трансформаторного масла от содержания в нем воды

Другие загрязнения (волокна, смолистые вещества и др.) подобно воде понижают электрическую прочность жидких диэлектриков.

Чистота поверхности электродов оказывает существенное влияние на электрическую прочность жидких диэлектриков.

Большая продолжительность воздействия электрического поля на жидкий диэлектрик вызывает резкое снижение пробивного напряжения (рис. 3.35).

Конфигурация электрического поля и полярность электродов также вызывают изменение пробивных напряжений жидких диэлектриков (см. § 13.3).

Пробивное напряжение жидких диэлектриков повышается с увеличением давления (рис. 3.36). Зависимость пробивного напряжения от давления заметно уменьшается с повышением степени очистки электроизоляционных жидкостей, что указывает на большое влияние газообразных примесей.

При импульсных воздействиях напряжения на слой жидкого диэлектрика зависимости пробивного напряжения от давления практически не наблюдается. С увеличением плотности жидкого диэлектрика его электрическая прочность линейно возрастает.

Влияние температуры на пробивные напряжения жидких диэлектриков различно в зависимости от их химического состава и степени загрязнения примесями. Заметные изменения электрической прочности с температурой наблюдаются у электроизоляционных жидкостей сложного химического состава, особенно при

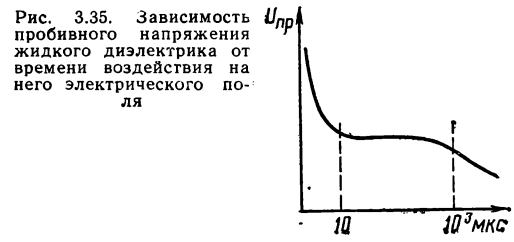


Рис. 3.35. Зависимость пробивного напряжения жидкого диэлектрика от времени воздействия на него электрического поля

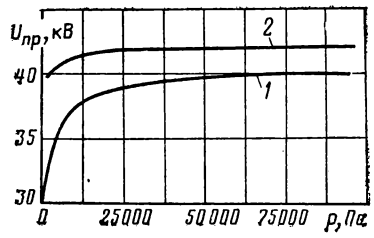


Рис. 3.36. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления при 50 Гц:

1 — невакуумированное масло; *2* — вакуумированное масло

наличии в них загрязнений (влага, газы и др.). По мере приближения к температуре кипения электрическая прочность жидких диэлектриков резко понижается. Наибольший практический интерес представляют теории, посвященные процессам пробоя технических электроизоляционных жидкостей. В большинстве этих теорий (авторы Н. Н. Семенов и А. Ф. Вальтер, Эдлер и др.) пробой жидких диэлектриков рассматривается как тепловой процесс, в результате которого в слое жидкого диэлектрика образуются газовые или паровые каналы. Паровая и газовая фазы в жидком диэлектрике возникают при нагреве его токами проводимости, повышенные значения которых наблюдаются в наиболее загрязненных частях диэлектрика. При критических значениях напряженности электрического поля в газовых и паровых каналах начинает развиваться процесс ударной ионизации газа, завершающийся пробоем.

Пробой твердых диэлектриков представляет собой или чисто электрический процесс (электрическая форма пробоя), или тепловой процесс (тепловая форма пробоя). В основе электрического пробоя лежат явления, в результате которых в твердых диэлектриках имеет место лавинное возрастание электронного тока, подобно тому как это наблюдается в процессе ударной ионизации в газообразных диэлектриках.

Характерными признаками электрического пробоя твердых диэлектриков являются:

1. Независимость или очень слабая зависимость электрической прочности диэлектрика от температуры и длительности приложенного напряжения (до 10^{-7}—10^{-8} с).

2. Электрическая прочность твердого диэлектрика в однородном поле не зависит от толщины диэлектрика (до толщин 10^{-4}—10^{-5} см).

3. Электрическая прочность твердых диэлектриков находится в сравнительно узких пределах: 10^8—10^9 В/м; причем она больше, чем при тепловой форме пробоя.

4. Перед пробоем ток в твердом диэлектрике увеличивается по экспоненциальному закону, а непосредственно перед наступлением пробоя наблюдается скачкообразное возрастание тока.

5. При наличии неоднородного поля электрический пробой происходит в месте наибольшей напряженности поля (краевой эффект).

Тепловой пробой имеет место при повышенной проводимости твердых диэлектриков и больших диэлектрических потерях, а также при подогреве диэлектрика посторонними источниками теплоты или при плохом теплоотводе. Процесс теплового пробоя твердого диэлектрика состоит в следующем. Вследствие неоднородности состава отдельные части объема диэлектрика обладают повышенной проводимостью. Они представляют собой тонкие каналы, проходящие через всю толщину диэлектрика. Вследствие повышенной плотности тока в одном из таких каналов будут выделяться значительные количества теплоты. Это повлечет за собой еще большее нарастание тока вследствие резкого уменьшения сопротивления этого участка в диэлектрике. Процесс нарастания теплоты будет продолжаться до тех пор, пока не произойдет тепловое разрушение материала (расплавление, науглероживание) по всей его толщине по ослабленному месту.

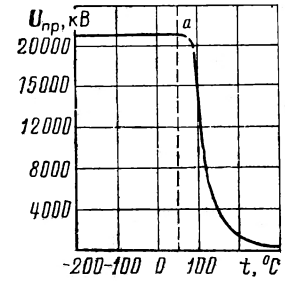


Рис. 3.37. Зависимость пробивного напряжения от температуры для электротехнического фарфора (*а*—точка перехода к тепловому пробою)

Характерными признаками теплового пробоя твердых диэлектриков являются:

1. Пробой наблюдается в месте наихудшего теплоотвода от диэлектрика в окружающую среду.

2. Пробивное напряжение диэлектрика снижается с повышением температуры окружающей среды.

3. Пробивное напряжение снижается с увеличением длительности приложенного напряжения.

4. Электрическая прочность уменьшается с увеличением толщины диэлектрика.

5. Электрическая прочность твердого диэлектрика уменьшается с ростом частоты приложенного переменного напряжения.

При пробое твердых диэлектриков часто наблюдаются случаи, когда до определенной температуры имеет место электрический пробой, а затем в связи с дополнительным нагревом диэлектрика наступает процесс теплового пробоя диэлектрика (рис. 3.37).

Аналогичный переход электрической формы пробоя в тепловую происходит в зависимости от времени выдержки твердого диэлектрика под напряжением.

Согласно выводам теории теплового пробоя твердых диэлектриков (В. А. Фок, Н. Н. Семенов) можно подсчитать пробивные напряжения для простых электроизоляционных конструкций (пластины) по формулам:

а) для постоянного напряжения

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{33{,}6k_д}{a\gamma_0}}\,\varphi(c);$$

б) для переменного напряжения

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{60{,}5k_д}{a\varepsilon_r f \operatorname{tg}\delta}}\,10^6\,\varphi(c),$$

где $\varphi(c)$ — функция величины

$$c = \frac{k_0 h}{k_э + k_0\Delta}\,\frac{k_э}{k_д};$$

k_0 — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; $k_э$ — коэффициент теплопроводности материала электродов; $k_д$ — коэффициент теплопроводности диэлектрика; h — половина толщины диэлектрика; Δ — толщина электрода; a — температурный коэффициент диэлектрических потерь ТК ($\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta$); ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика (при температуре окружающей среды); $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических по-

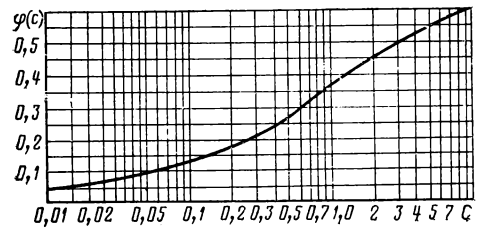


Рис. 3.38. Значение функции φ(c). К расчету пробивного напряжения твердого диэлектрика при тепловом пробое (по В. А. Фоку)

терь твердого диэлектрика (при температуре окружающей среды); f — частота.

По известным значениям k_0, h, $k_д$, $k_э$, Δ вычисляют значение c и, воспользовавшись графиком (рис. 3.38), находят $\varphi(c)$.

При неограниченном возрастании c функция $\varphi(c)$ стремится к пределу, равному 0,66.

3.9. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В основе работы квантовых усилителей и генераторов лежит эффект индуцированного (вынужденного) излучения. Он заключается в том, что под воздействием внешнего электромагнитного поля частица может излучать квант энергии и перейти в состояние с меньшей энергией.

Молекулы, атомы, ионы и электроны образуют микросистему, движение и ориентация микрочастиц которой определяют дискретный ряд энергий — энергетические состояния, или энергетические уровни. Внутренняя энергия микрочастиц квантована. Они могут переходить только с одного энергетического уровня на другой. Если конечная внутренняя энергия микросистемы при воздействии на нее электромагнитных колебаний больше начальной энергии, то разность между ними пополняется за счет поглощения энергии электромагнитного поля. И, наоборот, если энергия отдается электромагнитному полю, происходит излучение и конечное состояние системы соответствует меньшей энергии, чем начальное.

Энергия поля излучения (фотонов) также квантована, так что обмен энергией между полем и микросистемой может происходить только дискретно. Если энергия частицы в верхнем энергетическом состоянии W_2, а в нижнем W_1, то частота ν_{21} электромагнитных колебаний, связанных с переходом системы между этими состояниями, определяется условием Бора $W_2 - W_1 = h\nu_{21}$. Излучение состоит, таким образом, из фотонов с определенной частотой.

Если микросхема находится в верхнем энергетическом состоянии, то имеется определенная вероятность того, что через некоторый промежуток времени она перейдет в нижнее состояние и произойдет излучение энергии. Эта вероятность имеет две составляющие: постоянную и переменную. Постоянная составляющая аналогична вероятности распада реактивного вещества: она зависит от свойств системы и данного перехода и не зависит от внешних факторов. Переменная составляющая зависит от плотности энергии внешнего электромагнитного поля, имеющего частоту перехода. Поле с частотой перехода повышает вероятность излучения системой, находящейся в верхнем состоянии.

Когда внешнее электромагнитное поле отсутствует, процесс перехода системы в нижнее состояние, характеризуемый постоянной составляющей вероятности перехода и сопровождаемый излучением, называется *спонтанным излучением*. Если на квантовую систему действует внешнее поле с частотой перехода, то спонтанные переходы происходят по-прежнему, причем фазы испускаемого излучения не зависят от внешнего электромагнитного поля. Переходы, вызванные внешним полем с частотой перехода, сопровождаются излучением, находящимся в определенном фазовом соотношении с внешним полем. Этот процесс называется вынужденным или *индуцированным излучением*.

Система, находящаяся в верхнем энергетическом состоянии, может, таким образом, стать источником излучения. Система, находящаяся в нижнем энергетическом состоянии, способна только поглощать излучение с частотой перехода. Микросистема может усиливать или генерировать излучение только в том случае, когда число частиц («населенность») на верхнем энергетическом уровне больше, чем на нижнем. Такое состояние системы называют возбужденным или инверсным, поскольку в условиях термодинамического равновесия населенность нижнего («основного») энергетического уровня всегда больше.

Для достижения возбужденного состояния система должна поглотить энергию не обязательно в виде излучения. Требуемая энергия может быть получена путем электронной или ионной бомбардировки, механическим воздействием, нагреванием и другими способами.

После прохождения в поглощающей среде пути l интенсивность (мощность) электромагнитного излучения $I \approx I_0 \exp(-kl)$, где коэффициент поглощения $k = \sigma(N_1 - N_2) + k_0$ увеличивается с ростом разности населенности N_1 и N_2 нижнего и верхнего энергетических уровней и поперечного сечения поглощения σ (k_0 — коэффициент нерезонансных потерь). В условиях термодинамического равновесия или близких к ним $N_1 > N_2$, $k > 0$ система всегда ведет себя как поглощающая. Для возбужденной системы характерны инверсия населенностей $N_2 > N_1$ и отрицательное значение коэффициента поглощения ($k = -\alpha < 0$). В этом случае плотность проходящего излучения по мере прохождения через среду начинает увеличиваться по экспоненциальному закону $I = I_0 \exp(\alpha l)$. В этом и заключается *эффект квантового усиления*.

Мощность излучения, выходящего из такого усилителя, тем больше, чем больше частиц участвует в переходах с верхнего уровня на нижний. При этом возрастает коэффициент усиления $\alpha = \sigma(N_2 - N_1) - k_0$. Усиление тем больше, чем больше путь l, пройденный лучом. Значительного увеличения этого пути можно добиться, помещая среду в резонатор, обеспечивающий многократное прохождение за счет многократных отражений. В диапазоне сверхвысоких частот для этой цели используются объемные полые металлические резонаторы. В оптическом диапазоне резонатор образует два параллельных зеркала.

Резонатор способствует достижению уровня обратной связи, который позволяет превра-

тить квантовый усилитель в *квантовый генератор*. Это происходит, когда уровень усиления превысит потери, а инверсная населенность превысит пороговое значение

$$N_2 - N_1 = \gamma/\sigma L,$$

где γ — коэффициент потерь; L — длина оптического резонатора.

Излучение квантового генератора обусловлено индуцированными переходами, которые происходят одновременно у большого числа возбужденных частиц, и поэтому имеет большую мощность. Вынужденное излучение происходит синфазно с индуцирующим излучением. Поэтому при индуцированном возбуждении обеспечивается фазовая когерентность и происходит сложение полей элементарных излучателей. В результате мощность результирующей волны возрастает и может достигнуть уровня межмолекулярных полей. При спонтанном излучении, представляющем собой неупорядоченный, статистический процесс, когерентность отсутствует и генерируются лишь шумы.

Характерными особенностями излучения *лазеров* (оптических квантовых генераторов) являются когерентность, монохроматичность и узконаправленность. Монохроматичность определяется квантованием энергии микрочастиц, стабильностью и дискретностью уровней, между которыми происходят энергетические переходы. Узконаправленность обеспечивается селективным характером усиления параксиальных лучей зеркалами оптического резонатора.

Источник накачки предназначен для возбуждения лазерного активного элемента и обеспечивает такое распределение атомов по энергетическим уровням, при котором между двумя выбранными уровнями достигается инверсия. Двухуровневый метод использует для возбуждения те же два собственных состояния (уровня) системы, которые используются в процессе усиления. Поэтому инверсия и усиление должны быть разделены либо в пространстве, либо во времени.

Если инверсия и усиление разделены во времени, то для усиления и генерации используется та же среда, что и в процессе инверсии. Это означает, что система не может функционировать в качестве усилителя по крайней мере в течение времени, необходимого для осуществления инверсии. Такие системы могут быть использованы только в импульсном режиме и поэтому имеют ограниченную область применения.

В случае непрерывно действующего возбуждения ансамбль микросистем инвертируется вне области усиления. Затем возбужденная система вводится в область усиления, взаимодействует с полем сигнала и, наконец, выводится оттуда. Примером метода сортировки молекулярного пучка является первый работавший квантовый усилитель на пучке молекул аммиака ($\lambda = 1{,}25$ см).

Трехуровневый метод использует эффект насыщения одного из переходов (между основным и верхним уровнем) под действием вспомогательного излучения для получения инверсии населенностей между другой парой уровней этой системы (между основным и промежуточным метастабильным уровнем). Основным преимуществом этого метода является независимость систем возбуждения и усиления, поскольку для них резонансные частоты различны. Этот метод используется в рубиновых квантовых генераторах ($\lambda = 694{,}3$ нм). Большей эффективностью обладает четырехуровневый метод возбуждения за счет того, что усиление происходит при переходах с метастабильного уровня не на сильно заселенный основной, а на более высокий уровень (возбуждения) с меньшей населенностью. Поэтому инверсная населенность между этими уровнями может быть достигнута при относительно низких мощностях накачки (когда населенность самого верхнего уровня сравнительно мала). Четырехуровневый метод используется в неодимовых лазерах ($\lambda = 1{,}06$ мкм).

По типу фазового состояния активного вещества лазеры делятся на газовые, твердотельные и жидкостные.

В *газовых лазерах* для накачки используют разряды трех видов.

1. Тлеющий или высокочастотный разряд. Для непрерывно действующих лазеров на нейтральных атомах чаще всего используется столб тлеющего разряда при плотности тока 0,1—0,2 А/см^2. Электронная концентрация прямо пропорциональна плотности тока, а средняя электронная температура определяется в большинстве случаев произведением давления газа в трубке и ее диаметра.

2. Импульсный разряд с послесвечением. Значительные плотности тока (до 300 А/см^2) позволяют получить импульсную генерацию с большими усилением и выходной мощностью. В послесвечении разряда преобладают процессы с большими временами диссоциации и рекомбинации.

3. Импульсный разряд короткой длительности используется для накачки лазеров на самоограниченных переходах. Достижение инверсной населенности возможно только тогда, когда время нарастания импульса тока сравнимо с радиационным временем жизни верхнего энергетического уровня. При этом необходимые значения плотности тока достигают тысяч ампер на квадратный сантиметр.

В перечисленных условиях инверсная населенность достигается в результате действия одного или нескольких перечисленных ниже механизмов возбуждения: передача возбуждения (потенциальной энергии) от одного атома к другому в результате неупругого столкновения (II рода), передача возбуждения при диссоциации, оптическая накачка в результате селективного возбуждения (на резонансной частоте перехода), возбуждение атома неупругим электронным ударом, накачка излучательными каскадными переходами, возбуждение при нейтрализации зарядов двух ионов, фотодиссоциация молекул (если энергия фотона достаточна для диссоциации молекул, возбуждения атома и передачи кинетической энергии образовавшимся атомам).

Твердотельные лазеры используют в качестве активной среды примесные кристаллы, стекла и полупроводники. Генерация и усиление в примесных кристаллах осуществляются в результате переходов возбужденных ионов-активаторов, внедренных в решетку основного кристалла, в устойчивое состояние. Накачка производится оптически, чаще всего с помощью газоразрядных ламп. Кроме ионов-активаторов в кристаллы вводят иногда другие ионы, назы-

ваемые сенсибилизирующими добавками. Они позволяют получить дополнительное поглощение энергии накачки и передать ее лазерному иону, повышая таким образом эффективность преобразования.

В лазерах на основе стекол, легированных ионами редкоземельных элементов, генерация и усиление излучения осуществляются при переходах этих ионов с возбужденных на устойчивые уровни. В качестве активаторов используются трехвалентные ионы Nd, Tb, Yb, Ho и Er. Лазеры на активированных стеклах работают в подавляющем большинстве в импульсном режиме, используя для оптической накачки ксеноновые газоразрядные лампы.

В полупроводниковых лазерах генерация и излучение происходят на переходах между зоной проводимости и валентной зоной или между зоной и уровнями, образуемыми примесями в запрещенной зоне самого полупроводника. Наибольшую эффективность и распространение имеет накачка путем инжекции носителей заряда и облучением пучком быстрых электронов. Используются иногда оптическая накачка и ударная ионизация при лавинном пробое. При комнатных температурах генерация получена в кристаллах GaAs, $Al_{1-x}Ga_xAs$, $GaAs_{1-x}P_x$, CdS и ZnO. Наиболее широкое применение получили генераторы на арсениде галлия ($\lambda = 830 \div 910$ нм).

Жидкостные лазеры используют в качестве активных сред растворы, содержащие либо ионы редкоземельных элементов, либо органические красители. Эти лазеры используют оптическую накачку импульсных ксеноновых газоразрядных ламп или интенсивное излучение других лазеров. В лазерах на хелатах активными элементами являются трехвалентные ионы редких земель, связанные с органическими группами или лигандами. В качестве лиганд наиболее часто употребляются бензолацетон, дибензоилметан, пентафторпропионат, тенонитрифторацетон и трифторацетилацетон, в качестве катионов — пиперидин, пиридин, натрий, аммиак и имидазол; в качестве растворителей — спирты (этанол, метанол), диметилформамид, ацетонитрил и диметилсульфоксид. Из апротонных жидких материалов лазерный эффект достигнут пока только в растворе соли редкоземельного элемента неодима (Nd^{+3}) в неорганическом растворителе (селен- и фосфорксихлоридах). Лазерный эффект получен для шести классов органических красителей: оксазольных, антраценовых, кумароновых, акридиновых, ксантеновых и полиметриновых.

Список литературы

3.1. **Степаненко И. П.** Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1977. 672 с.

3.2. **ГОСТ 22622-77.** Материалы полупроводниковые. Термины и определения.

3.3. **Стафеев В. И., Каракушан Э. И.** Магнитодиоды. М.: Наука, 1975. 216 с.

3.4. **Марченко А. М.** Управляемые полупроводниковые резисторы. М.: Энергия, 1978. 215 с.

3.5. **Хомерики О. К.** Гальваномагнитные элементы и устройства автоматики и вычислительной техники. М.: Энергия, 1975. 176 с.

3.6. **Таблицы** физических величин/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.

3.7. **Прикладная** электролюминесценция. М.: Советское радио, 1974. 414 с.

3.8. **ГОСТ 21515-76.** Материалы диэлектрические. Термины и определения

3.9. **Зенкевич В. Б., Сычев В. В.** Магнитные системы на сверхпроводниках. М.: Наука, 1972. 260 с.

3.10. **Буккель В.** Сверхпроводимость. М.: Мир, 1975. 366 с.

3.11. **Вонсовский С. В., Изюмов Ю. А., Курмаев Э. З.** Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений. М.: Наука, 1977. 384 с.

3.12. **Кресин В. З.** Сверхпроводимость и сверхтекучесть. М.: Наука, 1978. 188 с.

3.13. **ГОСТ 23869-79.** Материалы сверхпроводниковые. Термины и определения.

3.14. **Кухаркин Е. С.** Инженерная электрофизика. Техническая электродинамика. М.: Высшая школа, 1982. 520 с.

3.15. **Богданов Г. Б., Бокринская А. А.** Ферритовые термисторы. Киев: ГИТЛ УССР, 1966. 192 с.

3.16. **Даниель-Бек В. С., Рогинская Н. С.** Термоэлектрогенераторы. М.: Связьиздат, 1966. 56 с.

3.17. **Добрецов Л. Н.** Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966. 564 с.

3.18. **Ворончев Т. А., Соболев В. Д.** Физические основы электровакуумной техники. М.: Высшая школа, 1967. 352 с.

3.19. **Соболева Н. А., Меламид А. Е.** Фотоэлектронные приборы. М.: Высшая школа. 376 с.

3.20. **ГОСТ 13820-77.** Приборы электровакуумные. Термины и определения.

3.21. **Теория** диэлектриков. Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобинский, А. А. Воробьев, Б. М. Тареев. М.: Энергия, 1965. 344 с.

3.22. **Богородицкий Н. П., Пасынков В. В, Тареев Б. М.** Электротехнические материалы. М.: Энергия, 1977. 352 с.

3.23. **Электрорадиоматериалы.** Б. М. Тареев, Н. В. Короткова, В. М. Петров, А. А. Преображенский. М.: Высшая школа, 1978. 380 с.

3.24. **Тареев Б. М.** Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.

3.25. **Электрические** свойства полимеров/Б. И. Сажин и др. Л.: Химия, 1977. 192 с.

3.26. **Корицкий Ю. В.** Основы физики диэлектриков. М.: Энергия, 1979. 248 с.

Раздел 4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

СОДЕРЖАНИЕ

4.1. Линейные цепи постоянного и синусоидального токов 75

Постоянный ток (75). Мгновенное, действующее и среднее значения синусоидальных величин (75). Представление синусоидальных величин комплексными числами (76). Параметры элементов цепи и схемы замещения (76). Пассивные двухполюсники (77). Активные двухполюсники (80). Зависимые источники (81). Взаимная индуктивность (81). Мощность (82). Схемы электрических цепей и их графы (83). Законы Кирхгофа (83). Топографические векторные диаграммы (84). Резонанс напряжений и резонанс токов (85). Применение законов Кирхгофа для расчета электрических цепей (85). Метод контурных токов (86). Метод узловых потенциалов (87). Расширенные узловые уравнения (89). Применение топологических методов расчета (91). Взаимная эквивалентная замена источников тока и ЭДС (92). Метод активного двухполюсника (92). Метод наложения (93). Преобразования схем соединения элементов тре-

угольником и звездой (93). Метод подобия (93). Принцип компенсации (93). Теорема вариаций (94). Теорема взаимности (94). Линейные соотношения (94). Передаточная функция (94). Об обозначении напряжений на схемах (94). Сигнальные графы (94).
4.2. Трехфазные цепи 96
Трехфазная система с нейтральным проводом (96). Трехфазная система без нейтрального провода (97). Симметричная трехфазная система (98). Метод симметричных составляющих (98).
4.3. Несинусоидальные токи 99
Разложение периодических функций в тригонометрический ряд (99). Действующие и средние значения несинусоидальных периодических величин (101). Коэффициенты несинусоидальности (101). Мощность (101). Эквивалентные синусоиды (102). Высшие гармоники в трехфазных цепях (102).
4.4. Переходные процессы 102
Переходные процессы в линейных цепях с сосредоточенными параметрами (102). Классический метод (102). Переходные процессы в простейших цепях (104). Метод переменных состояний (109). Операторный метод (111). Оригиналы и изображения по Лапласу (112). Формулы Хевисайда (112). Интеграл Дюамеля (113). Интеграл Фурье (113). Включение ветвей (114). Отключение ветвей (115). 115
4.5. Четырехполюсники, фильтры и линии
Несимметричные четырехполюсники (115). Связь коэффициентов четырехполюсников (116). Пассивные симметричные четырехполюсники (118). Коэффициенты и параметры симметричных четырехполюсников (119). *LC*-фильтры (121). *rC*-фильтры (безындуктивные) (121). Цепные схемы и другие соединения четырехполюсников (122). Активные четырехполюсники (123). Линия с потерями (123). Определение постоянных линий по опытам холостого хода и короткого замыкания (123). Упрощенные формулы (124). Линия с малыми потерями (125). Линия без потерь (125). Переходные процессы в цепях с распределенными параметрами (125). Отражение волны прямоугольной формы от конца линии (126). Падение волны прямоугольной формы на узел соединения двух линий (127).
4.6. Нелинейные резистивные цепи . . . 129
Компонентные уравнения (129). Топологические уравнения (129). Узловые, контурные и расширенные узловые уравнения (130). Решение уравнений методом простой итерации (131). Решение уравнений методом Ньютона (132). Дискретные линейные модели нелинейных резистивных цепей (132).
4.7. Магнитные цепи 133
Магнитные цепи постоянного тока (133). Аналитические методы расчета (135). Магнитная цепь с постоянным магнитом (135). Магнитные цепи переменного тока (136). Взаимная связь магнитного потока, ЭДС индукции, напряжения и тока в катушке со стальным магнитопроводом (137). Схема замещения катушки со стальным магнитопроводом при учете потерь (137).
4.8. Переходные процессы в нелинейных цепях 138
Численные методы (138). Метод переменных состояния (138). Метод дискретных моделей (139).
4.9. Электрическое поле 139
Закон Кулона (139). Напряженность поля. Потенциал (139). Поляризованность, смещение (140). Ток, плотность тока (142). Уравнения Лапласа и Пуассона. Граничные условия (142). Распределение потенциала в системе проводящих заряженных тел (142). Емкость (143). Частичные емкости (143). Моделирование (143). Энергия электростатического поля. Силы (143).
4.10. Магнитное поле 143
Магнитная индукция и магнитный поток (143). Намагниченность. Напряженность магнитного поля (144). Закон полного тока (144). Потенциалы магнитного поля. Граничные условия (144). Энергия. Электродинамические силы (144). Электромагнитная индукция (наведение ЭДС) (145). Самоиндукция и взаимная индукция (145). Самоиндукция и взаимная индукция (145).
4.11. Электромагнитное поле 14
Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в неподвижной среде (145). Граничные условия (145). Потенциалы (146). Уравнения Максвелла в комплексной форме (146). Определение потерь. Теорема Умова — Пойнтинга (146).
4.12. Сопротивление, емкость, индуктивность 146
Сопротивление проводника (146). Емкости конденсаторов и проводов (146). Метод электростатической аналогии (147). Индуктивность и взаимная индуктивность проводов (147). Индуктивность катушек (147). Емкость, индуктивность и взаимная индуктивность воздушных линий (148). Индуктивность коаксиального кабеля (149).
Список литературы 150

4.1. ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО И СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКОВ

Постоянный ток

При анализе и расчете цепей постоянного тока остаются справедливыми все законы и расчетные методы, записанные ниже для цепей переменного тока, если положить $\omega=0$ и вместо комплексных значений токов, напряжений и ЭДС в формулах брать действительные значения величин.

Мгновенное, действующее и среднее значения синусоидальных величин

Мгновенное значение синусоидальной (косинусоидальной) величины (рис. 4.1)

$$a = A_m \sin(\omega t + \alpha) = A_m \cos(\omega t + \beta);$$
$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T,$$

где A_m — амплитуда (максимальное значение); ω — угловая (круговая) частота; f — частота (число циклов изменения в единицу времени); T — период; $\alpha=\beta+\pi/2$ — начальная фаза; $\omega t+\alpha$, $\omega t+\beta$ — фаза (в радианах или градусах).

Действующее значение

$$A = A_m/\sqrt{2}$$

равно среднеквадратическому за период

$$A^2 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} a^2\, d\omega t = \frac{1}{T}\int_0^{T} a^2\, dt.$$

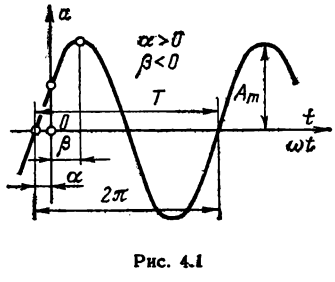


Рис. 4.1

Среднее значение за период равно нулю. Среднее за половину периода

$$A_{ср} = \frac{1}{\pi}\int_{-\alpha}^{\pi-\alpha} a\, d\omega t = \frac{2}{\pi} A_m.$$

Под синусоидальной величиной a можно понимать ток $i=i(t)$, напряжение $u=u(t)$, ЭДС $e=e(t)$, магнитный поток $\Phi(t)$ и т. д.

Представление синусоидальных величин комплексными числами

Всякую синусоидально изменяющуюся величину $a=A_m \sin(\omega t+\alpha)$ можно представить вектором на комплексной плоскости (рис. 4.2, *а*). Длина вектора равна амплитуде A_m, угол между вектором и осью действительных значений равен начальной фазе α.

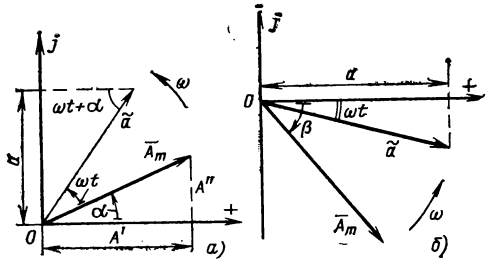


Рис. 4.2

Вектор $\bar{A}_m$, изображающий синусоидальную величину a, обозначают $\underline{A}_m = A_m e^{j\alpha} = A_m \angle\alpha = A_m\cos\alpha + jA_m\sin\alpha = A' + jA''$ и рассматривают как комплексное число (комплексную амплитуду).

Если вращать вектор $\bar{A}_m = \underline{A}_m$ с угловой скоростью ω (равной угловой частоте синусоидальной величины) против направления движения часовой стрелки, то в момент времени t вектор будет расположен под углом $\omega t+\alpha$ к оси действительных значений (рис. 4.2, *а*). Такой вращающийся вектор записывается в виде комплексной гармонической функции $\tilde{a} = A_m e^{j(\omega t+\alpha)} = \underline{A}_m e^{j\omega t}$.

Мгновенное значение синусоидальной величины a есть проекция вращающегося вектора на ось мнимых значений или мнимая часть $\underline{A}_m e^{j\omega t}$: a = мнимая часть $\tilde{a} = \mathrm{Im}[A_m e^{j(\omega t+\alpha)}] = \mathrm{Im}[A_m \cos(\omega t + \alpha) + jA_m \sin(\omega t + \alpha)] = A_m \sin(\omega t + \alpha)$.

Если задана косинусоидально изменяющаяся величина $a=A_m \cos(\omega t+\beta)$, то она изображается вектором $\underline{A}_m = A_m e^{j\beta}$ (рис. 4.2, *б*) и мгновенное значение есть проекция вращающегося вектора $\tilde{a} = A_m e^{j(\omega t+\beta)}$ на ось действительных значений: a-действительная часть $\tilde{a} = \mathrm{Re}[A_m e^{j(\omega t+\beta)}]$.

На комплексной плоскости обычно изображают не векторы $\underline{A}_m$, а векторы $\underline{A} = \underline{A}_m/\sqrt{2}$ — комплексные действующие значения синусоидальных величин.

Совокупность векторов $\underline{A}$, изображающих несколько синусоидальных величин, образует векторную диаграмму (см. рис. 4.3, 4.4 и др.).

При расчете электрических цепей начальная фаза α (или β) одной из синусоидальных величин может быть взята произвольной и, в частности, равной нулю. Все другие синусоидальные величины будут иметь тогда вполне определенные начальные фазы.

Параметры элементов цепи и схемы замещения

При анализе электрических цепей их заменяют схемами замещения, содержащими пассивные элементы: резистивный с сопротивлением r, индуктивный с индуктивностью L, емкостный с емкостью C и активные элементы: источники ЭДС (напряжения) и источники тока.

Резистивный элемент с сопротивлением r (рис. 4.3, *а*). Если $i=I_m \sin(\omega t+\alpha)$, то $u = u_{аб} = \varphi_а - \varphi_б = ri = rI_m \sin(\omega t + \alpha) = U_m \sin(\omega t+\alpha)$, где $U_m = rI_m$.

В комплексной форме $\underline{U}_m = r\underline{I}_m$ или $\underline{U} = r\underline{I}$, где $\underline{I} = \underline{I}_m/\sqrt{2} = I_m\angle\alpha/\sqrt{2}$; $\underline{U} = \underline{U}_m/\sqrt{2} = U_m\angle\alpha/\sqrt{2}$.

Индуктивный элемент с индуктивностью L (рис. 4.3, *б*). Если $i=I_m \sin(\omega t+\alpha)$, то $u = u_{аб} = L\, di/dt = U_m \sin(\omega t+\alpha+90°)$, где $U_m = \omega L I_m$; $\omega L = x_L$ — индуктивное сопротивление; $1/\omega L = b_L$ называется индуктивной проводимостью.

В комплексной форме

$$\underline{U} = \omega L \underline{I} e^{j90°} = j\omega L \underline{I} = jx_L \underline{I}.$$

Емкостный элемент с емкостью C (рис. 4.3, *в*). Если $i=I_m \sin(\omega t+\alpha)$, то

$$u_C = \frac{1}{C}\int i\, dt = U_m \sin(\omega t + \alpha - 90°),$$

где $U_m = (1/\omega C) I_m$; $1/\omega C = x_C$ — емкостное сопротивление; $\omega C = b_C$ называется емкостной проводимостью.

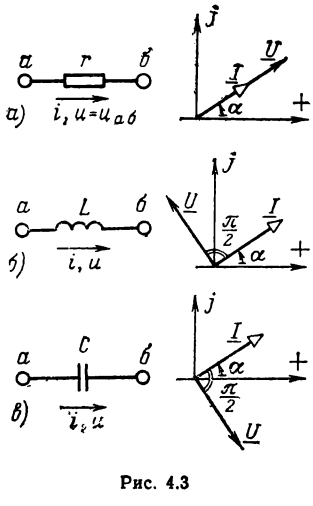


Рис. 4.3

В комплексной форме

$$\underline{U} = -j\frac{1}{\omega C}\underline{I} = \frac{1}{j\omega C}\underline{I} = -jx_C\underline{I}.$$

Пассивные двухполюсники

Пассивные элементы могут соединяться последовательно, параллельно, смешанно (последовательно-параллельное соединение) и составлять мостовые схемы, образуя пассивные двухполюсники (рис. 4.4, *а*). Если

$$u = u_{аб} = \varphi_a - \varphi_б = U_m \sin(\omega t + \beta),$$

то

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha); \qquad U_m = zI_m; \qquad I_m = yU_m,$$

где z — полное сопротивление двухполюсника; y — полная проводимость двухполюсника.

В комплексной форме

$$\underline{U} = \underline{U}_m/\sqrt{2} = U_m e^{j\beta}/\sqrt{2} = U \angle \beta;$$

$$\underline{I} = \underline{I}_m/\sqrt{2} = I_m e^{j\alpha}/\sqrt{2} = I \angle \alpha.$$

По закону Ома

$$\underline{U} = \underline{Z}\,\underline{I},$$

где $\underline{Z} = 1/\underline{Y} = ze^{j\varphi} = z\angle\varphi = r + jx$ — комплексное сопротивление двухполюсника; r — активное сопротивление; x — реактивное сопротивление; $z = \sqrt{r^2 + x^2}$; $\operatorname{tg}\varphi = x/r$; $\cos\varphi = r/z$. Иначе

$$Ue^{j\beta} = ze^{j\varphi} Ie^{j\alpha},$$

откуда $U = zI$; $\beta = \varphi + \alpha$, где $\varphi = \beta - \alpha$ — угол сдвига фаз между напряжением и током.

По закону Ома

$$\underline{I} = \underline{Y}\,\underline{U},$$

где $\underline{Y} = 1/\underline{Z} = ye^{-j\varphi} = y\angle -\varphi = g - jb$ — комплексная проводимость двухполюсника; g — активная проводимость; b — реактивная проводимость;

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}; \qquad \operatorname{tg}\varphi = b/g; \qquad \cos\varphi = g/y.$$

Иначе

$$Ie^{j\alpha} = ye^{-j\varphi} Ue^{j\beta},$$

откуда $I = yU$; $\alpha = \beta - \varphi$.

Если $\varphi > 0$, то вектор напряжения на векторной диаграмме опережает вектор тока — индуктивный режим (рис. 4.4, *б*). Если $\varphi < 0$, то вектор тока опережает вектор напряжения — емкостный режим (рис. 4.4, *в*).

Угол сдвига фаз φ может быть определен из векторной диаграммы по проекциям векторов на две взаимно перпендикулярные оси (рис. 4.4, *б*):

$$\varphi = \beta - \alpha; \qquad \operatorname{tg}\beta = U''/U'; \qquad \operatorname{tg}\alpha = I''/I'.$$

В табл. 4.1 приведены схемы и даны параметры простых пассивных двухполюсников.

Примечания: 1. Если любая из ветвей двухполюсника содержит n *последовательно* соединенных резистивных, m индуктивных и p емкостных элементов, то

$$r = \sum_{k=1}^{n} r_k; \qquad L = \sum_{k=1}^{m} L_k;$$

$$\frac{1}{C} = \sum_{k=1}^{p} \frac{1}{C_k}.$$

2. Если участок двухполюсника содержит n *параллельно* соединенных резистивных, m индуктивных и p емкостных элементов, то

$$\frac{1}{r} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{r_k}; \qquad \frac{1}{L} = \sum_{k=1}^{m} \frac{1}{L_k}; \qquad C = \sum_{k=1}^{p} C_k.$$

Как для схем, приведенных в табл. 4.1, так и в общем случае пассивный двухполюсник может быть представлен двумя схемами замещения (рис. 4.5, *а* и *б*).

Для схемы замещения по рис. 4.5, *а*

$$\underline{U} = \underline{Z}\,\underline{I} = \underline{U}_a + \underline{U}_p,$$

где $\underline{U}_a = r\underline{I}$ — активная составляющая напряжения; $\underline{U}_p = jx\underline{I}$ — реактивная составляющая напряжения.

Значения U_a и U_p можно найти из векторной диаграммы путем построения треугольника напряжения (рис. 4.5, *в*; выполнен для случая $\varphi > 0$). Подобный ему треугольник, стороны которого в выбранном масштабе равны сопротивлениям z, r и $|x|$, есть треугольник сопротивлений (рис. 4.5, *г*).

Для схемы замещения по рис. 4.5, *б*

$$\underline{I} = \underline{Y}\,\underline{U} = \underline{I}_a + \underline{I}_p,$$

где $\underline{I}_a = g\underline{U}$ — активная составляющая тока; $\underline{I}_p = -jb\underline{U}$ — реактивная составляющая тока.

Значения I_a и I_p можно найти из векторной диаграммы путем построения треугольника токов (рис. 4.5, *в*). Подобный ему треугольник, стороны которого в выбранном масштабе равны проводимостям y, g и $|b|$, есть треугольник проводимостей (рис. 4.5, *д*).

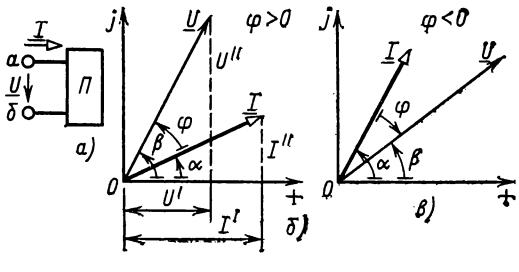


Рис. 4.4

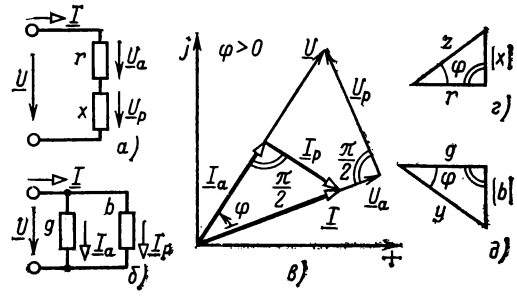
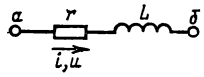
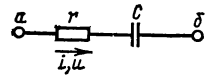
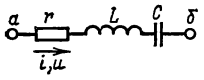
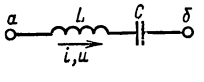
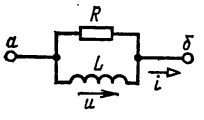
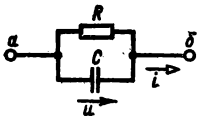
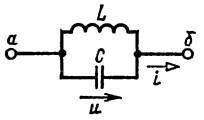
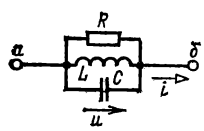
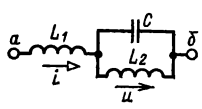
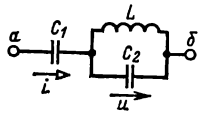
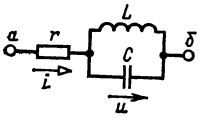
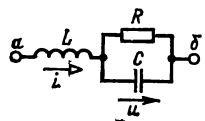
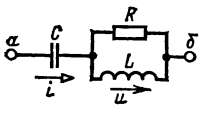
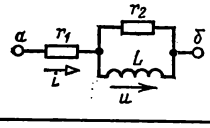
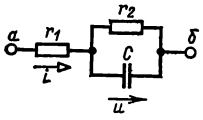
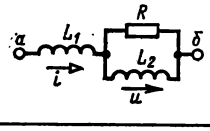
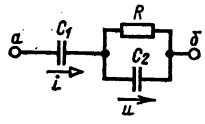
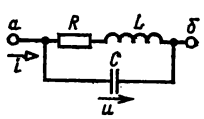


Рис. 4.5

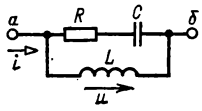
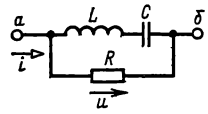
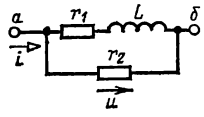
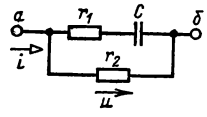
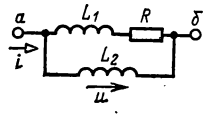
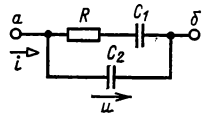
Таблица 4.1. **Сопротивления и проводимости двухполюсников**

Схема	Сопротивление	Проводимость	Векторная диаграмма
	$x = x_L = \omega L;$ $\underline{Z} = r + jx_L;$ $\operatorname{tg}\varphi = x_L/r$	$g = r/\left(r^2 + x_L^2\right);$ $b = x_L/\left(r^2 + x_L^2\right) = b_L;$ $\underline{Y} = g - jb_L;$ $\operatorname{tg}\varphi = b_L/g$	По рис. 4.4, *б*
	$x = -x_C = -1/\omega C;$ $\underline{Z} = r - jx_C;$ $\operatorname{tg}\varphi = -x_C/r$	$g = r/\left(r^2 + x_C^2\right);$ $b = -x_C/\left(r^2 + x_C^2\right) = -b_C;$ $\underline{Y} = g + jb_C;$ $\operatorname{tg}\varphi = -b_C/g$	По рис. 4.4, *в*
	$x = x_L - x_C = \omega L - 1/\omega C;$ $\underline{Z} = r + j(x_L - x_C);$ $\operatorname{tg}\varphi = \dfrac{x_L - x_C}{r}$	$g = \dfrac{r}{r^2 + (x_L - x_C)^2};$ $b = \dfrac{x_L - x_C}{r^2 + (x_L - x_C)^2};$ $\underline{Y} = g - jb;\quad \operatorname{tg}\varphi = b/g$	При $x_L > x_C$ ($b > 0$) по рис. 4.4, *б*; при $x_L < x_C$ ($b < 0$) по рис. 4.4, *в*
	$x = x_L - x_C = \omega L - 1/\omega C;$ $z = \lvert x_L - x_C \rvert;$ $\underline{Z} = j(x_L - x_C);$ при $x_L > x_C$ угол $\varphi = 90°$,	$g = 0;\quad b = \dfrac{1}{x_L - x_C};$ $\underline{Y} = -jb$ при $x_L < x_C$ угол $\varphi = -90°$	При $x_L > x_C$ по рис. 4.3, *б*; при $x_L < x_C$ по рис. 4.3, *в*
	$r = g/\left(g^2 + b_L^2\right);$ $x = b_L/\left(g^2 + b_L^2\right) = x_L;$ $\underline{Z} = r + jx_L;$ $\operatorname{tg}\varphi = x_L/r$	$g = 1/R;$ $b = b_L = 1/\omega L;$ $\underline{Y} = g - jb_L;$ $\operatorname{tg}\varphi = b_L/g$	По рис. 4.4, *б*
	$r = g/\left(g^2 + b_C^2\right);$ $x = -b_C/\left(g^2 + b_C^2\right) = -x_C;$ $\underline{Z} = r - jx_C;$ $\operatorname{tg}\varphi = -x_C/r$	$g = 1/R;$ $b = -b_C = -\omega C;$ $\underline{Y} = g + jb_C;$ $\operatorname{tg}\varphi = -b_C/g$	По рис. 4.4, *в*
	$r = 0;\quad x = \dfrac{1}{b_L - b_C};$ $\underline{Z} = jx$ при $b_L > b_C$ угол $\varphi = 90°$,	$g = 0;\quad b = b_L - b_C = 1/\omega L - \omega C;$ $y = \lvert b_L - b_C \rvert;$ $\underline{Y} = -j(b_L - b_C)$ при $b_L < b_C$ угол $\varphi = -90°$	При $b_L > b_C$ по рис. 4.3, *б*; при $b_L < b_C$ по рис. 4.3, *в*
	$r = \dfrac{g}{g^2 + (b_L - b_C)^2};$ $\underline{Z} = r + jx;$ $x = \dfrac{b_L - b_C}{g^2 + (b_L - b_C)^2};$ $\operatorname{tg}\varphi = x/r$	$g = 1/R;$ $b = b_L - b_C = 1/\omega L - \omega C;$ $\underline{Y} = g - j(b_L - b_C);$ $\operatorname{tg}\varphi = (b_L - b_C)/g$	При $b_L > b_C$ ($x > 0$) по рис. 4.4, *б*; при $b_L < b_C$ ($x < 0$) по рис. 4.4, *в*

Продолжение табл. 4.1

Схема	Сопротивление	Проводимость	Векторная диаграмма
	$r = 0;$ $x = x_{L1} - \frac{x_{L2}\, x_C}{x_{L2} - x_C}$	$g = 0;$ $b = 1/x;$	При $x>0$ ($b>0$) по рис. 4.3, *б*; при $x<0$ ($b<0$) по рис. 4.3, *в*
	$r = 0;\quad x = -x_{C1} - \frac{x_L\, x_{C2}}{x_L - x_{C2}}$		
	$x_L = \omega L;\quad x_C = 1/\omega C;$ $x = -\frac{x_L\, x_C}{x_L - x_C}$	Переход от активного r и реактивного x сопротивлений к активной g и реактивной b проводимостям по общим формулам перехода от схемы замещения по рис. 4.5, *а* к схеме замещения по рис. 4.5, *б*	При $x_L > x_C$ по рис. 4.4, *б*; при $x_L < x_C$ по рис 4. 4, *в*
	$r = \frac{R}{1 + (R/x_C)^2};$ $x = x_L - \frac{x_C}{1 + (x_C/R)^2} = X_L - X_C$		При $X_L > X_C$ по рис. 4. 4, *б*; при $X_L < X_C$ по рис. 4. 4, *в*
	$r = \frac{R}{1 + (R/x_L)^2};$ $x = \frac{x_L}{1 + (x_L/R)^2} - x_C = X_L - X_C$		При $X_L > X_C$ по. рис. 4. 4, *б*; при $X_L < X_C$ по рис. 4. 4, *в*
	$r = r_1 + \frac{r_2}{1 + (r_2/x_L)^2};$ $x = \frac{x_L}{1 + (x_L/r_2)^2}$		По рис. 4.4, *б*
	$r = r_1 + \frac{r_2}{1 + (r_2/x_C)^2};$ $x = \frac{-x_C}{1 + (x_C/r_2)^2}$		По рис. 4.4, *в*
	$r = \frac{R}{1 + (R/x_{L2})^2};$ $x = \frac{x_{L2}}{1 + (x_{L2}/R)^2} + x_{L1}$		По рис. 4.4, *б*
	$r = \frac{R}{1 + (R/x_{C2})^2};$ $x = \frac{-x_{C2}}{1 + (x_{C2}/R)^2} - x_{C1}$		По рис. 4.4, *в*
		$g = \frac{R}{R^2 + x_L^2};\quad b = b_L - b_C = \frac{x_L}{R^2 + x_L^2} - \frac{1}{x_C}$	При $b_L > b_C$ по рис. 4. 4, *б*; при $b_L < b_C$ по рис. 4. 4, *в*

Продолжение табл. 4.1

Схема	Сопротивление	Проводимость	Векторная диаграмма
	Переход от активной g и реактивной b проводимостей к активному r и реактивному x сопротивлениям по общим формулам перехода от схемы замещения по рис. 4.5, *б* к схеме замещения по рис. 4.5, *а*	$g=\frac{R}{R^2+x_C^2}$; $b=b_L-b_C=\frac{1}{x_L}-\frac{x_C}{R^2+x_C^2}$	При $b_L>b_C$ по рис. 4. 4, *б*; при $b_L<b_C$ по рис. 4. 4, *в*
		$g=\frac{1}{R}$; $b=\frac{1}{x_L-x_C}$	При $x_L>x_C$ по рис. 4. 4, *б*; при $x_L<x_C$ по рис 4. 4, *в*
		$g=\frac{1}{r_2}+\frac{r_1}{r_1^2+x_L^2}$; $b=\frac{x_L}{r_1^2+x_L^2}$	По рис. 4.4, *б*
		$g=\frac{1}{r_2}+\frac{r_1}{r_1^2+x_C^2}$; $b=\frac{-x_C}{r_1^2+x_C^2}$	По рис. 4.4, *в*
		$g=\frac{R}{R^2+x_{L1}^2}$; $b=\frac{1}{x_{L2}}+\frac{x_{L1}}{R^2+x_{L1}^2}$	По рис. 4.4, *б*
		$g=\frac{R}{R^2+x_{C1}^2}$; $b=-\frac{1}{x_{C2}}-\frac{x_{C1}}{R^2+x_{C1}^2}$	По рис. 4.4, *в*

Вычисление g и b по известным r и x или наоборот, т. е. переход от схемы замещения по рис. 4.5, *а* к схеме замещения по рис. 4.5, *б* и наоборот, выполняется по формулам:

$$g=\frac{r}{r^2+x^2}=\frac{r}{z^2};\quad b=\frac{x}{r^2+x^2}=\frac{x}{z^2};$$

$$r=\frac{g}{g^2+b^2}=\frac{g}{y^2};\quad x=\frac{b}{g^2+b^2}=\frac{b}{y^2}.$$

При $x>0$ ($b>0$) элемент, обозначенный на рис. 4.5, *а* (рис. 4.5, *б*) прямоугольником и буквой x (b), — индуктивный (для этого случая дана диаграмма на рис. 4.5, *в*), при $x<0$ ($b<0$) — емкостный.

Иногда принимают $\underline{Y}=g+jb$, что противоречит ГОСТ 19880-74. Тогда

$$b=\frac{-x}{r^2+x^2};\quad x=\frac{-b}{g^2+b^2}.$$

Активные двухполюсники

Источник электрической энергии, когда известны его ЭДС $\underline{E}$ или ток короткого замыкания $\underline{I}_к=\underline{J}$ и внутреннее сопротивление $\underline{Z}_{вт}=r+jx$ или проводимость $\underline{Y}_{вт}=g-jb$, может быть представлен схемами замещения с источником ЭДС (рис. 4.6, *а*) или с источником тока (рис. 4.6, *б*), причем $\underline{J}=\underline{E}/\underline{Z}_{вт}$ и $\underline{Y}_{вт}=1/\underline{Z}_{вт}$, где $\underline{Z}_{вт}=r+jx$, $\underline{Y}_{вт}=g-j\underline{b}$ (переход от r и x к g и b и наоборот — см. выше). Если при расчете цепи можно $\underline{Z}_{вт}$ не учитывать, т. е. положить в схеме рис. 4.6, *а* $\underline{Z}_{вт}=0$, то источник энергии заменяется идеальным источником ЭДС E, если можно $\underline{Y}_{вт}$ не учитывать, т. е. положить в схеме рис. 4.6, *б* $\underline{Y}_{вт}=0$, то источник энергии заменяется идеальным источником тока $\underline{J}$.

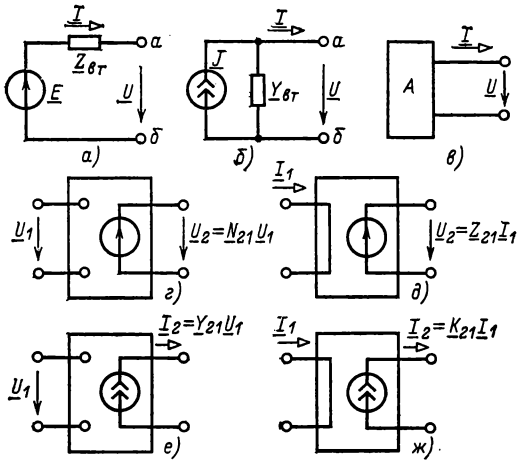


Рис. 4.6

Для схемы рис. 4.6, *а*: $\underline{U}=\underline{U}_{аб}=\underline{\varphi}_а-\underline{\varphi}_б=\underline{E}-\underline{I}\underline{Z}_{вт}$. Для схемы рис. 4.6, *б*: $\underline{U}=\underline{U}_{аб}=\underline{\varphi}_а-\underline{\varphi}_б=(\underline{J}-\underline{I})/\underline{Y}_{вт}$.

Эти схемы справедливы и для произвольного активного двухполюсника (рис. 4.6, *в*). В этом случае $\underline{E}=\underline{U}_х$ — напряжение холостого хода на выводах двухполюсника; $\underline{Z}_{вт}=\underline{Z}_{вх}$ — входное сопротивление активного двухполюсника, равное сопротивлению соответствующего пассивного двухполюсника (получается, когда ЭДС активного двухполюсника приняты равными нулю, а все ветви с источниками тока разомкнуты).

Зависимые источники

На рис. 4.6, *г*—*ж* представлены четыре различные схемы зависимых (управляемых) источников: 1) источник напряжения (ЭДС), управляемый напряжением (ИНУН — рис. рис. 4.6, *г*), 2) источник напряжения, управляемый током (ИНУТ — рис. 4.6, *д*), 3) источник тока, управляемый напряжением (ИТУН — рис. 4.6, *е*), 4) источник тока, управляемый током (ИТУТ — рис. 4.6, *ж*). Их можно считать неавтономными активными четырехполюсниками с матрицами (см. также § 4.5):

$$\text{ИНУН: } \mathbf{A}=\begin{Vmatrix} 1/\underline{N}_{21} & 0 \\ 0 & 0 \end{Vmatrix};\quad \mathbf{G}=\begin{Vmatrix} 0 & 0 \\ \underline{N}_{21} & 0 \end{Vmatrix};$$

$$\text{ИНУТ: } \mathbf{A}=\begin{Vmatrix} 0 & 0 \\ 1/\underline{Z}_{21} & 0 \end{Vmatrix};\quad \mathbf{Z}=\begin{Vmatrix} 0 & 0 \\ \underline{Z}_{21} & 0 \end{Vmatrix};$$

$$\text{ИТУН: } \mathbf{A}=\begin{Vmatrix} 0 & 1/\underline{Y}_{21} \\ 0 & 0 \end{Vmatrix};\quad \mathbf{Y}=\begin{Vmatrix} 0 & 0 \\ \underline{Y}_{21} & 0 \end{Vmatrix};$$

$$\text{ИТУТ: } \mathbf{A}=\begin{Vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1/\underline{K}_{21} \end{Vmatrix};\quad \mathbf{H}=\begin{Vmatrix} 0 & 0 \\ \underline{K}_{21} & 0 \end{Vmatrix}.$$

Другие матрицы не существуют.

Взаимная индуктивность

Последовательное включение двух индуктивно связанных катушек (рис. 4.7, *а*).

Общее напряжение

$$u=L_1\frac{di}{dt}\pm M\frac{di}{dt}+L_2\frac{di}{dt}\pm M\frac{di}{dt},$$

где M — взаимная индуктивность.

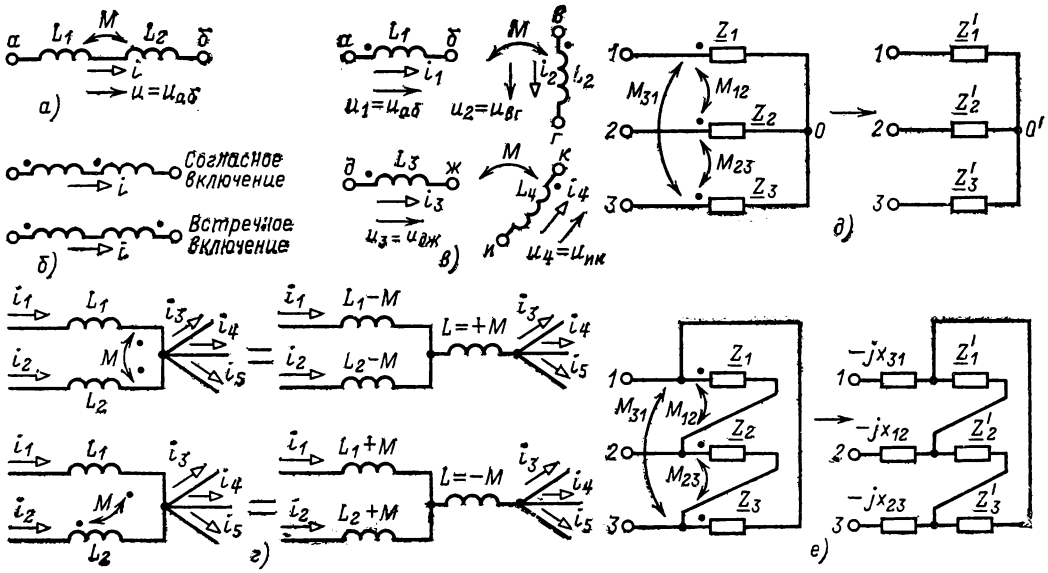


Рис. 4.7

В комплексной форме

$$\underline{U} = (j\omega L_1 \pm j\omega M + j\omega L_2 \pm j\omega M)\,\underline{I},$$

где $\omega M = x_M$ — сопротивление взаимной индукции, или

$$\underline{U} = j\omega L \underline{I},$$

где $L = L_1 + L_2 \pm 2M$.

Знак плюс ставится при согласном соединении катушек, знак минус — при встречном.

Согласное соединение получается, когда магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции в каждой катушке суммируются, что указывается на схеме одинаковым направлением тока относительно одноименных выводов (рис. 4.7, *б*), обозначаемых точками.

Коэффициент связи

$$k = M/\sqrt{L_1 L_2}.$$

Понятие о согласном и встречном включениях обобщают на катушки, включенные в разные ветви, и вообще на контуры, если они имеют индуктивную связь (рис. 4.7, *в*):

$$\underline{U}_1 = j\omega L_1 \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2; \quad \underline{U}_2 = j\omega L_2 \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1;$$

$$\underline{U}_3 = j\omega L_3 \underline{I}_3 - j\omega M \underline{I}_4; \quad \underline{U}_4 = j\omega L_4 \underline{I}_4 - j\omega M \underline{I}_3.$$

Стрелки на схемах показывают выбранные произвольно положительные направления токов и напряжений.

После выбора положительных направлений слагаемые вида $j\omega L_k \underline{I}_k$ и $j\omega M \underline{I}_n$ суммируются, если выбранные токи одинаково направлены относительно одноименных выводов (обозначенных точками), и вычитаются в противном случае. Резистивные сопротивления катушек учитываются так же, как и при отсутствии индуктивной связи между катушками.

Схему цепи, содержащей *две катушки*, обладающие взаимной индуктивностью и присоединенные к одному и тому же узлу, можно заменить схемой цепи, не содержащей катушек со взаимной индуктивностью (рис. 4.7, *г*).

Устранение индуктивной связи возможно и в случае *трех* индуктивно связанных ветвей: а) соединения трехлучевой звездой (рис. 4.7, *д*) и б) соединения треугольником (рис. 4.7, *е*). Для звезды $\underline{Z}'_1 = \underline{Z}_1 - jx_{12} + jx_{23} - jx_{31}$; $\underline{Z}'_2 = \underline{Z}_2 - jx_{12} - jx_{23} + jx_{31}$; $\underline{Z}'_3 = \underline{Z}_3 + jx_{12} - jx_{23} - jx_{31}$ и $\varphi_0' \neq \varphi_0$. Для треугольника $\underline{Z}'_1 = \underline{Z}_1 + jx_{12} + jx_{31}$; $\underline{Z}'_2 = \underline{Z}_2 + jx_{12} + jx_{23}$; $\underline{Z}'_3 = \underline{Z}_3 + jx_{23} + jx_{31}$, где $x_{ik} = j\omega M_{ik}$.

Мощность

Мгновенная мощность любого участка цепи или двухполюсника определяется как произведение мгновенных значений напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \beta)$ и тока $i = I_m \sin(\omega t + \alpha)$:

$$p = ui = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t + \psi),$$

где $\varphi = \beta - \alpha$; $\psi = \beta + \alpha$.

Среднее значение мощности или активная мощность произвольного активного или пассивного двухполюсника

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt = UI\cos\varphi = \frac{U_m I_m}{2}\cos\varphi.$$

Здесь U и I — напряжение и ток на выводах двухполюсника; φ — угол сдвига фаз между напряжением и током. Положительные направления напряжений и тока пассивного двухполюсника должны быть взяты, как на рис. 4.4, *а*, активного двухполюсника — как на рис. 4.6.

$S = UI$ — полная мощность; $P/S = \cos\varphi$ — коэффициент мощности; $Q = UI\sin\varphi$ — реактивная мощность;

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad \operatorname{tg}\varphi = Q/P.$$

Мощность в комплексной форме

$$\underline{S} = P + jQ = \underline{U}\,\underline{I}^* = UI\cos\varphi + jUI\sin\varphi,$$

где $\underline{S}$ — полная мощность в комплексной форме; $\underline{I}^* = I\angle -\alpha$ — сопряженный комплексный ток и $S = |\underline{S}|$.

Иногда принимают

$$\underline{S} = \underline{U}^*\underline{I} = P - jQ,$$

где $\underline{U}^* = U\angle -\beta$ — сопряженное комплексное напряжение.

Для *пассивных* двухполюсников и их схем замещения (см. рис. 4.5) $S = UI = zI^2 = yU^2$; $P = UI\cos\varphi = U_a I = UI_a = rI^2 = gU^2$; $Q = UI\sin\varphi = xI^2 = bU^2$; $|Q| = U_p I = UI_p$.

При $\varphi > 0$ (рис. 4.5, *в*) $Q > 0$, при $\varphi < 0$ и $Q < 0$.

Закон Джоуля—Ленца. В резистивных сопротивлениях электрической цепи мгновенная мощность $p = ri^2 = ui$.

Активная мощность

$$P = UI = rI^2 = rI_m^2/2 = U^2/r = U_m^2/2r.$$

Мощность источников. Мощность, развиваемая источником ЭДС (рис. 4.6, *а*),

$$\underline{S}_и = P_и + jQ_и = \underline{E}\,\underline{I}^*.$$

Мощность, развиваемая источником тока (рис. 4.6, *б*),

$$\underline{S}_и = P_и + jQ_и = \underline{U}\,\underline{J}^*.$$

В любом случае (рис. 4.6) мощность, отдаваемая во внешнюю часть цепи,

$$\underline{S} = \underline{U}\underline{I}^* = P + jQ; \quad S = UI,$$

т. е. одинакова, но мощности, развиваемые источниками ЭДС и тока, различны.

Баланс мощности. Для электрической цепи справедлив закон:

ΣP источников $= \Sigma P$ приемников;

ΣQ источников $= \Sigma Q$ приемников или

$\Sigma \underline{S}$ источников $= \Sigma \underline{S}$ приемников.

Указанные равенства являются следствием закона сохранения энергии и могут служить одним из средств проверки правильности расчета.

«Активная» энергия W_a и «реактивная» энергия W_p, определяющая реактивную мощность приемника или источника, в течение времени t:

$$W_a = \int_0^t P\,dt; \quad W_p = \int_0^t Q\,dt.$$

Схемы электрических цепей и их графы

Схема электрической цепи, состоящей из пассивных и активных двухполюсников, содержит пассивные элементы (резистивные, индуктивные, емкостные) и активные элементы (источники ЭДС и тока). Участок электрической цепи, состоящий только из последовательно соединенных элементов (с одним и тем же током), образует ветвь, направление ветви в топологическом смысле совпадает с выбранным положительным направлением тока ветви. Направление ветви имеет другой смысл, чем у сигнального графа (см. ниже). Точка соединения ветвей образует узел. Например, схема цепи, изображенная на рис. 4.8, *а*, состоит из шести ветвей, которые соединяются в четырех узлах: *a*, *b*, *c* и *d*.

Условное изображение схемы, в котором каждая ветвь заменена отрезком линии, называется графом схемы (цепи). Граф тоже состоит из ветвей и узлов и для одной и той же схемы может быть изображен различными способами. Например, для схемы по рис. 4.8, *а* на рис. 4.8, *б* показаны два из различных возможных изображений графа. Топологические (геометрические) свойства для всех изображений одинаковы: существуют взаимно однозначное соотношение между узлами и ветвями, т. е. такие графы изоморфные. Например, для всех изображений узлы *b* и *d* соединены ветвью *1*. Часть графа образует подграф: путь, контур, дерево, связь, сечение. Путь — это упорядоченная последовательность ветвей, в которой каждые две соседние ветви имеют общий узел, причем входящие в путь ветви и узлы встречаются только 1 раз (например, на рис. 4.8, *б* ветви *1—3—6*). Контур — замкнутый путь, в котором один из узлов — и начало и конец пути (например, на рис. 4.8, *б* ветви *1—3—5*). У связного графа между любой парой узлов существует путь. Деревом связного графа называется связный подграф, содержащий все узлы, но ни одного контура. Например, на рис. 4.8, *в* показаны два дерева графа по рис. 4.8, *б*. Для схем, имеющих форму полного многоугольника с y узлами, число деревьев равно y^{y-2}; например, для мостовой схемы рис. 4.8, *а* получается $4^2=16$ деревьев. Связи графа дополняют дерево до исходного графа. Для деревьев на рис. 4.8, *в* ветви связи даны на рис. 4.8, *г*.

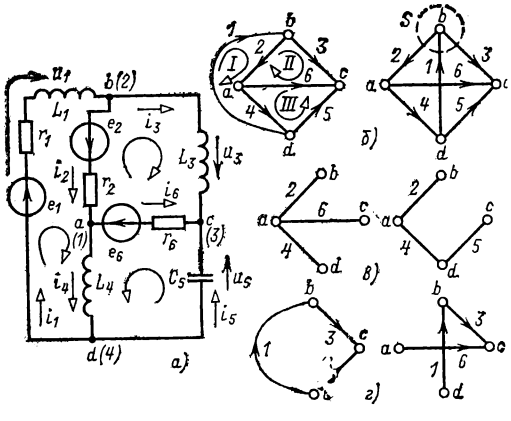


Рис. 4.8

Если граф (схема) имеет $в$ ветвей и $у$ узлов, то любое дерево содержит $д=у-1$ ветвей; число ветвей связи $к=в-(у-1)$.

Сечением называется множество ветвей, удаление которых делит граф (схему) на два изолированных подграфа (подсхемы), один из которых в частном случае может быть изолированным узлом. Так, на рис. 4.8, *б* показана пунктиром поверхность S, рассекающая граф на две части. Число главных контуров, каждый из которых состоит из ветвей дерева и одной из ветвей связи, тоже равно $к$. Главное сечение состоит из связей и одной ветви дерева. Их число равно $д$.

Законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа. При произвольно выбранных положительных направлениях токов во всех ветвях алгебраическая сумма мгновенных или комплексных токов ветвей, присоединенных к узлу, равна нулю:

$$\sum_k i_k = 0; \quad \sum_k \underline{I}_k = 0,$$

где $k=1, 2, ..., n$ (n — число ветвей, сходящихся в узле).

При составлении уравнений токи, направленные от узла, записываются со знаком плюс, а направленные к узлу — со знаком минус (или наоборот). Например, для узла *b* (рис. 4.8, *а*)

$$-i_1 + i_2 + i_3 = 0; \quad \underline{I}_1 - \underline{I}_2 - \underline{I}_3 = 0.$$

Второй закон Кирхгофа. При положительном направлении напряжения каждой k-й ветви $u_k^{(в)}$, совпадающем с положительным направлением тока i_k этой ветви, для любого контура

$$\sum_k u_k^{(в)} = 0; \quad \sum_k \underline{U}_k^{(в)} = 0,$$

где со знаком плюс записываются напряжения, направление которых совпадает с направлением обхода этого контура, и со знаком минус противоположно направленные. Например, для контура из ветвей *1*, *3*, *5* на рис. 4.8, *а*

$$u_1^{(в)} + u_3^{(в)} - u_5^{(в)} = 0; \quad \underline{U}_1^{(в)} + \underline{U}_3^{(в)} - \underline{U}_5^{(в)} = 0.$$

Второй закон Кирхгофа можно записать и через напряжения на отдельных элементах схемы. Принимая всегда для пассивных элементов $\underline{U}=\underline{U}_{аб}=\underline{\varphi}_а-\underline{\varphi}_б=\underline{Z}\underline{I}$ (рис. 4.9, *а*), т. е. положительное направление напряжения совпадающим с положительным направлением тока, а для активных элементов $\underline{U}=\underline{U}_{аб}=\underline{\varphi}_а-\underline{\varphi}_б=\underline{E}$ (рис. 4.9, *б*), т. е. положительное направление напряжения от положительного вывода к отрицательному, получаем, что алгебраическая сумма мгновенных или комплексных на-

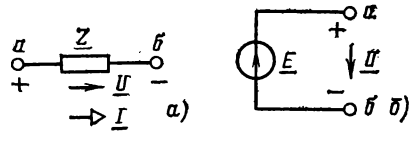


Рис. 4.9

пряжений на m пассивных и активных элементах контура равна нулю:

$$\sum_m u_m = 0; \quad \sum_m \underline{U}_m = 0.$$

Если напряжения источников перенести в правую часть уравнений и заменить на ЭДС, то

$$\sum_n u_n = \sum_n e_n; \quad \sum_n \underline{U}_n = \sum_n \underline{E}_n.$$

Здесь напряжения (падения напряжения) и ЭДС записываются со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением обхода вдоль контура, и со знаком минус в противоположном случае. Например, для контура из ветвей *1*, *3*, *5* на рис. 4.8, *а* (обход по часовой стрелке)

$$u_{r1} + u_{L1} + u_{L3} - u_{C5} = e_1$$

или

$$r_1 i_1 + L_1 di_1/dt + L_3 di_3/dt - \frac{1}{C_5}\int i_5\, dt = e_1;$$

$$r_1 \underline{I}_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 + j\omega L_3 \underline{I}_3 - \frac{1}{j\omega C_5}\underline{I}_5 = \underline{E}_1.$$

Специальных стрелок для положительных направлений падений напряжения можно не ставить, если для пассивных элементов всегда принимать, что $\underline{U} = \underline{Z}\underline{I}$, т. е.

$$\underline{U} = \underline{U}_{аб} = \underline{\varphi}_а - \underline{\varphi}_б = \underline{Z}\,\underline{I} \quad \text{(рис. 4.9, } а\text{)},$$

где $\underline{\varphi}_а$ и $\underline{\varphi}_б$ — комплексные потенциалы (под комплексным потенциалом понимают комплексное напряжение между данной точкой и точкой, потенциал которой принят за нулевой).

Напряжения, уравновешивающие ЭДС взаимной индукции, записываются с тем же знаком, что и падения напряжения на соответствующих индуктивных элементах, при «согласном» включении и с обратным знаком при «встречном» включении.

Пример (рис. 4.10, *а*)

$$-\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0; \quad r\underline{I}_1 + j\omega L_1 \underline{I}_3 + j\omega M \underline{I}_2 = \underline{E}_1;$$

$$j\omega L_2 \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_3 + \frac{1}{j\omega C}\underline{I}_2 - j\omega L_1 \underline{I}_3 - j\omega M \underline{I}_2 = -\underline{E}_2.$$

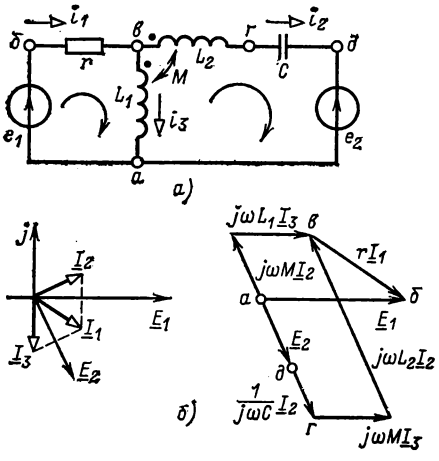


Рис. 4.10

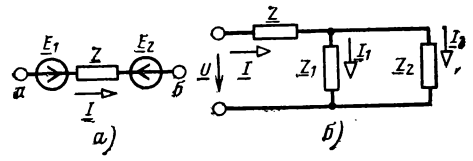


Рис. 4.11

Обобщенный закон Ома. Ток в какой-либо ветви определяется через разность потенциалов (напряжение) на концах ветви, ЭДС источников, включенных в эту ветвь, и сопротивление $\underline{Z}$ или проводимость $\underline{Y} = 1/\underline{Z}$ ветви (рис. 4.11, *а*) по формуле

$$\underline{I} = \underline{Y}(\underline{U}_{аб} + \underline{E}_1 - \underline{E}_2) = \frac{\underline{\varphi}_а - \underline{\varphi}_б + \underline{E}_1 - \underline{E}_2}{\underline{Z}}.$$

Правило знаков — из рис. 4.11, *а*. Индуктивные связи с другими ветвями должны отсутствовать.

Распределение тока в параллельных ветвях. В двух параллельных ветвях, не содержащих источников электрической энергии и ЭДС индукции, токи распределяются обратно пропорционально сопротивлениям ветвей (рис. 4.11, *б*):

$$\underline{I}_1 = \underline{I}\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \quad \underline{I}_2 = \underline{I}\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$$

или

$$\underline{I}_1 = \underline{U}\,\underline{Z}_2/\underline{\xi}; \quad \underline{I}_2 = \underline{U}\,\underline{Z}_1/\underline{\xi},$$

где

$$\underline{\xi} = \underline{Z}\,\underline{Z}_1 + \underline{Z}\,\underline{Z}_2;$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.$$

При трех параллельных ветвях с сопротивлениями $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_3$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}\frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_1};$$

токи $\underline{I}_2$ и $\underline{I}_3$ определяются аналогично (круговой заменой индексов).

В случае произвольного числа параллельных ветвей (при отсутствии индуктивных связей) для вычисления тока в одной из них целесообразно пользоваться общей формулой

$$\underline{I}_k = \underline{I}\,\underline{Y}_k/\underline{Y},$$

где $\underline{I}_k$ — ток в k-й ветви; $\underline{Y}_k$ — проводимость k-й ветви; $\underline{Y}$ — сумма проводимостей всех ветвей.

Топографические векторные диаграммы

Потенциал каждой точки электрической цепи может быть представлен соответствующей точкой на комплексной плоскости, так что разность потенциалов между какими-либо двумя точками $а$ и $б$ цепи выражается вектором, со-

единяющим соответствующие две точки на плоскости. При этом вектор $\underline{\varphi}_a - \underline{\varphi}_б = \underline{U}_{аб}$ строится по обычному правилу вычитания векторов. Его началом является точка *б*, концом (стрелка) — точка *а*.

Совокупность векторов напряжений и ЭДС, построенных на комплексной плоскости по этим правилам, образует топографическую диаграмму.

Пример. См. схему на рис. 4.10, *а* и топографическую диаграмму на рис. 4.10, *б*.

Резонанс напряжений и резонанс токов

В электротехнике, радиотехнике и смежных дисциплинах под фазовый резонанс понимают фазовый резонанс. При фазовом резонансе в пассивных двухполюсниках выполняются условия: мнимая часть $\underline{Z} = \operatorname{Im}\underline{Z} = 0$; мнимая часть $\underline{Y} = \operatorname{Im}\underline{Y} = 0$, где $\underline{Z}$ и $\underline{Y}$ — комплексные входные сопротивление и проводимость. При этом напряжение и ток на входных выводах двухполюсника совпадают по фазе.

Резонанс напряжений. Резонанс напряжений в двухполюснике (последовательный резонанс) наступает в том случае, когда комплексное сопротивление двухполюсника $\underline{Z}$ чисто резистивное ($x=0$).

В простейшем случае резонанс напряжений возможен в двухполюснике (ветви), содержащей последовательно включенные элементы с параметрами r, L, C (рис. 4.12, *а*):

$$\underline{Z} = r + j(x_L - x_C).$$

При резонансе

$$x_L = \omega L = x_C = 1/\omega C,$$

ток в фазе с общим напряжением

$$\underline{I} = \underline{U}/\underline{Z} = \underline{U}/r,$$

напряжения на индуктивном и на емкостном элементах равны по значению:

$$U_L = U_C,$$

напряжение на резистивном элементе U_r равно напряжению U между концами ветви: $U_r = U$ (рис. 4.12, *б*).

Резонанс можно получить, изменяя L, C или частоту ω. При резонансной частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ получается:

$$\omega_0 L = 1/\omega_0 C = \sqrt{L/C} = \rho.$$

Величина $Q = \rho/r$ — добротность характеризует резонансные свойства двухполюсника.

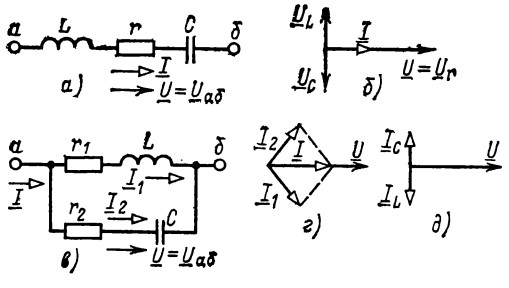


Рис. 4.12

Чем больше Q, тем больше U_L, U_C, I при резонансе:

$$U_L = U_C = QU; \quad I = QU/\rho.$$

Резонансные кривые

$$I = \frac{U}{r\sqrt{1 + Q^2(k - 1/k)^2}};$$

$$U_C = \frac{QU}{k\sqrt{1 + Q^2(k - 1/k)^2}};$$

$$U_L = \frac{kQU}{\sqrt{1 + Q^2(k - 1/k)^2}};$$

$$\operatorname{tg}\varphi = Q(k - 1/k),$$

где $k = \omega/\omega_0$

Резонанс токов. Резонанс токов в двухполюснике (параллельный резонанс) наступает в том случае, когда комплексная проводимость двухполюсника $\underline{Y}$ является резистивной ($b=0$).

В простейшем случае резонанс токов возможен в двухполюснике, состоящем из двух параллельных ветвей (рис. 4.12, *в*), в одной из которых последовательно включены элементы с параметрами r_1 и L, а в другой — с параметрами r_2 и C. В этом случае

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = g_1 - jb_1 + g_2 - jb_2;$$

$$g_1 = r_1/z_1^2; \quad b_1 = x_L/z_1^2; \quad g_2 = r_2/z_2^2;$$

$$b_2 = -x_C/z_2^2,$$

где

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}; \qquad z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_C^2}.$$

При резонансе $b = b_1 + b_2 = 0$, т. е. $\underline{I} = (g_1 + g_2)\underline{U}$ (общий ток в фазе с напряжением — рис. 4.12, *г*).

Резонанс можно получить, изменяя L, C, r_1, r_2 или частоту ω. При резонансе

$$\omega = \omega_0' = \frac{1}{\sqrt{LC}}\sqrt{(\rho^2 - r_1^2)/(\rho^2 - r_2^2)}.$$

Если взять $r_1 = r_2 = \sqrt{L/C} = \rho$, то при любой частоте общий ток оказывается в фазе с напряжением (непрерывный резонанс).

В идеальном контуре (рис. 4.12, *в* при $r_1 = r_2 = 0$) резонансная частота $\omega_0' = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ и при резонансе $I_C = I_L$ и $I = 0$ (рис. 4.12, *д*); при любой частоте:

$$I_L = \frac{U}{k\rho}; \quad I_C = \frac{Uk}{\rho};$$

$$I = \frac{U}{\rho}\left|k - \frac{1}{k}\right|,$$

где $k = \omega/\omega_0$.

Применение законов Кирхгофа для расчета электрических цепей

Если в электрической цепи известны все ЭДС и сопротивления, то можно рассчитать токи во всех ветвях, основываясь на законах Кирхгофа. Чтобы получить независимую си-

стему, достаточно составить по первому закону Кирхгофа уравнения для всех узлов или главных сечений, кроме одного, т. е. $д=у-1$ уравнений, а по второму закону уравнения для всех главных контуров, т. е. $к=в-(у-1)$. В частности, для планарных схем (не содержащих пересекающихся ветвей) независимые уравнения по второму закону получатся, если их составить для всех ячеек. Так, на рис. 4.8, *а* — три ячейки, состоящие соответственно из ветвей: *1, 2, 4*; *2, 3, 6* и *4, 6, 5*.

Пример (рис. 4.8, *а*). По первому закону Кирхгофа для узлов *a*, *b*, *c* имеем три [$д=(4-1)$] уравнения:

$$-\underline{I}_2+\underline{I}_4+\underline{I}_6=0; \quad -\underline{I}_1+\underline{I}_2+\underline{I}_3=0;$$
$$-\underline{I}_3-\underline{I}_5-\underline{I}_6=0.$$

По второму закону для трех ячеек-контуров — три [$к=6-(4-1)$] уравнения (связи графа выбраны, как показано в левой части рис. 4.8, *г*):

$$(r_1+j\omega L_1)\,\underline{I}_1+r_2\,\underline{I}_2+j\omega L_4\,\underline{I}_4=\underline{E}_1+\underline{E}_2;$$
$$-r_2\,\underline{I}_2+j\omega L_3\,\underline{I}_3-r_6\,\underline{I}_6=\underline{E}_6-\underline{E}_2;$$
$$j\omega L_4\,\underline{I}_4-j\frac{1}{\omega C_5}\,\underline{I}_5-r_6\,\underline{I}_6=\underline{E}_6.$$

Уравнения Кирхгофа для токов и напряжений можно записать в матричной форме. Различают три топологические матрицы. Матрица соединений (узловая) **A** — это таблица коэффициентов уравнений, составленных по первому закону для $д=у-1$ узлов. Строки (*i*) соответствуют узлам, столбцы (*j*) — ветвям. Элемент матрицы $a_{ij}=1$ или -1, если ветвь *j* соединена с узлом *i* и направлена соответственно от узла или к узлу; $a_{ij}=0$, если ветвь *j* не соединена с узлом *i*. Например, для схемы рис. 4.8, *а* или графа рис. 4.8, *б* (где направления ветвей совпадают с положительными направлениями токов)

$$\mathbf{A}=\begin{array}{c} a \\ b \\ c \end{array}\left\|\begin{array}{cccccc} 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \end{array}\right\|.$$

Вместо матрицы соединений может быть записана матрица сечений — таблица коэффициентов уравнений, составленных по первому закону для сечений. Если таблица составлена для главных сечений, то это матрица главных сечений.

Матрица контуров **B** — это таблица коэффициентов уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа. Строки (*i*) соответствуют контурам, столбцы (*j*) — ветвям; число строк равно числу независимых контуров *к*. Элемент матрицы $b_{ij}=1$ или -1, если ветвь *j* есть в контуре *i* и ее направление соответственно совпадает или противоположно направлению обхода; $b_{ij}=0$, если ветви *j* нет в контуре *i*. Направление обхода контура совпадает с направлением ветви связи этого контура. Например, для схемы рис. 4.8, *а* или графа рис. 4.8, *б*, выбранное дерево которого дано в левой части рис. 4.8, *в*, т. е. с ветвями дерева *2, 6, 4* и ветвями связи *1, 3, 5*, имеем три контура: *I, II, III* (рис. 4.8, *б*). Матрица контуров:

$$\mathbf{B}=\begin{array}{c} I \\ II \\ III \end{array}\left\|\begin{array}{cccccc} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{array}\right\|.$$

Матрицы-столбцы (векторы) токов и напряжений всех *n* ветвей:

$$\mathbf{i}=\left\|\begin{array}{c} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ i_n \end{array}\right\|; \quad \mathbf{u}^{(в)}=\left\|\begin{array}{c} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{array}\right\|.$$

Законы Кирхгофа в матричной форме:

$$\mathbf{Ai}=0; \quad \mathbf{Bu}^{(в)}=0.$$

Пример (рис. 4.8, *а*). По первому закону Кирхгофа произведение матрицы **A** на матрицу-столбец токов **I**, в которой $n=6$ (ветвей), соответствует трем независимым уравнениям (записаны для мгновенных значений):

$$-i_2+i_4+i_6=0 \quad \text{(узел } a\text{)};$$
$$-i_1+i_2+i_3=0 \quad \text{(узел } b\text{)};$$
$$-i_3-i_5-i_6=0 \quad \text{(узел } c\text{)}.$$

По второму закону произведение матрицы **B** на матрицу-столбец напряжений ветвей соответствует уравнениям:

$$u_1+u_2+u_4=0 \quad \text{(контур } I\text{)};$$
$$-u_2+u_3-u_6=0 \quad \text{(контур } II\text{)};$$
$$u_4+u_5-u_6=0 \quad \text{(контур } III\text{)}$$

или, так как

$$u_1=-e_1+r_1 i_1+L_1\,di_1/dt; \quad u_2=-e_2+r_2 i_2;$$
$$u_3=L_3\,di_3/dt; \quad u_4=L_4\,di_4/dt; \quad u_5=\frac{1}{C_5}\int i_5\,dt;$$
$$u_6=e_6+r_6 i_6,$$

уравнением

$$r_1 i_1+L_1\,di_1/dt+r_2 i_2+L_4\,di_4/dt=e_1+e_2;$$
$$-r_2 i_2+L_3\,di_3/dt-r_6 i_6=e_6-e_2;$$
$$L_4\,di_4/dt+\frac{1}{C_5}\int i_5\,dt-r_6 i_6=e_6.$$

Если схема содержит идеальные источники тока, то $у-1$ уравнений по первому закону составляются по тем же правилам. Уравнения по второму закону для контуров, включающих ветви с источниками тока, не составляются. При подсчете необходимого числа уравнений по формуле $к=в-(у-1)$ ветви с источниками тока в число *в* не входят. Дерево, ветви связи, главные контуры определяются при исключенных из схемы ветвях с идеальными источниками тока.

Для цепей, которые имеют индуктивно связанные катушки, в уравнениях по второму закону Кирхгофа должны быть учтены напряжения, компенсирующие ЭДС взаимной индукции.

Пример (рис. 4.10). Схема с двумя узлами (*а* и *в*) и двумя контурами-ячейками:

$$-\underline{I}_1+\underline{I}_2+\underline{I}_3=0; \quad r\underline{I}_1+\underline{U}_{ва}=\underline{E}_1;$$
$$\underline{U}_{вг}-j\frac{1}{\omega C}\,\underline{I}_2-\underline{U}_{ва}=-\underline{E}_2,$$

где $\underline{U}_{ва}=j\omega L_1\underline{I}_3+j\omega M\underline{I}_2$; $\underline{U}_{вг}=j\omega L_2\underline{I}_2+j\omega M\underline{I}_3$ (слагаемые с взаимной индуктивностью записаны с тем же знаком, что и слагаемые с индуктивностями, так как токи направлены одинаково относительно одноименных выводов).

Метод контурных токов

Принимая, что в каждом контуре, для которого составлялись уравнения по второму закону Кирхгофа, есть контурный ток, направление которого совпадает с направлением обхода контура, нужно составить такое же число уравнений и с тем же правилом знаков, что и при записи уравнений по второму закону Кирхгофа.

Пример (рис. 4.8, *а*). Система уравнений:

$$\underline{Z}_{11}\underline{I}_I + \underline{Z}_{12}\underline{I}_{II} + \underline{Z}_{13}\underline{I}_{III} = \underline{E}_I;$$
$$\underline{Z}_{21}\underline{I}_I + \underline{Z}_{22}\underline{I}_{II} + \underline{Z}_{23}\underline{I}_{III} = \underline{E}_{II};$$
$$\underline{Z}_{31}\underline{I}_I + \underline{Z}_{32}\underline{I}_{II} + \underline{Z}_{33}\underline{I}_{III} = \underline{E}_{III}.$$

где $\underline{Z}_{11}=r_1+j\omega L_1+r_2+j\omega L_4$; $\underline{Z}_{12}=\underline{Z}_{21}=-r_2$ (так как контурные токи $\underline{I}_I$ и $\underline{I}_{II}$ в сопротивлении r_2 направлены противоположно);

$$\underline{Z}_{13}=\underline{Z}_{31}=j\omega L_4; \quad \underline{Z}_{22}=r_2+j\omega L_3+r_6;$$
$$\underline{Z}_{23}=\underline{Z}_{32}=r_6;$$
$$\underline{Z}_{33}=j\omega L_4-j/\omega C_5+r_6; \quad \underline{E}_I=\underline{E}_1+\underline{E}_2;$$
$$\underline{E}_{II}=-\underline{E}_2+\underline{E}_6; \quad \underline{E}_{III}=\underline{E}_6.$$

Токи в ветвях: $\underline{I}_1=\underline{I}_I$; $\underline{I}_2=\underline{I}_I-\underline{I}_{II}$; $\underline{I}_3=\underline{I}_{II}$; $\underline{I}_4=\underline{I}_I+\underline{I}_{III}$; $\underline{I}_5=\underline{I}_{III}$; $\underline{I}_6=-\underline{I}_{II}-\underline{I}_{III}$.

Контурные уравнения записываются короче в матричной форме

$$\underline{\mathbf{Z}}^{(к)}\,\underline{\mathbf{I}}^{(к)}=\underline{\mathbf{E}}^{(к)},$$

где $\underline{\mathbf{I}}^{(к)}$ — матрица-столбец искомых контурных токов; $\underline{\mathbf{Z}}^{(к)}$ — квадратная матрица контурных сопротивлений; $\underline{\mathbf{E}}^{(к)}$ — матрица-столбец контурных ЭДС. Каждый диагональный элемент (или собственное контурное сопротивление) $\underline{Z}_{ii}$ матрицы $\underline{\mathbf{Z}}^{(к)}$ равен сумме комплексных сопротивлений ветвей, входящих в контур i; каждый внедиагональный элемент (или общее контурное сопротивление) $\underline{Z}_{ij}$ равен сопротивлению ветви, общей для контуров i и j, и записывается со знаком плюс (минус), если контурные токи направлены в общей ветви одинаково (противоположно). Элемент $\underline{E}_i^{(к)}$ матрицы контурных ЭДС равен алгебраической сумме ЭДС источников i-го контура; со знаком плюс (минус) записываются ЭДС, направления которых совпадают (противоположны) с направлениями контурных токов.

Пример. Для схемы рис. 4.8, *а*

$$\underline{\mathbf{Z}}^{(к)}=\begin{Vmatrix} (r_1+j\omega L_1+r_2+j\omega L_4) & -r_2 & j\omega L_4 \\ -r_2 & (r_2+j\omega L_3+r_6) & r_6 \\ j\omega L_4 & r_6 & (j\omega L_4-j/\omega C_5+r_6) \end{Vmatrix};$$

$$\underline{\mathbf{I}}^{(к)}=\begin{Vmatrix} \underline{I}_I \\ \underline{I}_{II} \\ \underline{I}_{III} \end{Vmatrix}; \qquad \underline{\mathbf{E}}^{(к)}=\begin{Vmatrix} \underline{E}_1+\underline{E}_2 \\ \underline{E}_6-\underline{E}_2 \\ \underline{E}_6 \end{Vmatrix}.$$

Токи в ветвях $\underline{\mathbf{I}}=\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\underline{\mathbf{I}}^{(к)}$, где $\mathbf{B}^{\mathrm{T}}$ — транспонированная матрица $\mathbf{B}$.

Если схема содержит идеальные источники тока, то следует учесть замечания, сделанные выше относительно уравнений по второму закону Кирхгофа для схемы с источниками тока.

Матрицу контурных сопротивлений $\underline{\mathbf{Z}}^{(к)}$ можно получить и при помощи матрицы контуров $\mathbf{B}$:

$$\underline{\mathbf{Z}}^{(к)}=\mathbf{B}\underline{\mathbf{Z}}^{(в)}\mathbf{B}^{\mathrm{T}},$$

где $\underline{\mathbf{Z}}^{(в)}$ — диагональная матрица сопротивлений ветвей.

Пример. Для схемы рис. 4.8, *а* матрица $\mathbf{B}$ была получена при составлении уравнений Кирхгофа.

$$B=\begin{Vmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{Vmatrix}.$$

Диагональная матрица сопротивлений ветвей (рис. 4.8, *а*)

$$\underline{Z}^{(в)}=\begin{Vmatrix} (r_1+j\omega L_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j\omega L_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j\omega L_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -j/\omega C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_6 \end{Vmatrix}.$$

Произведение

$$B\underline{Z}^{(в)}=\begin{Vmatrix} (r_1+j\omega L_1) & r_2 & 0 & j\omega L_4 & 0 & 0 \\ 0 & -r_2 & j\omega L_3 & 0 & 0 & -r_6 \\ 0 & 0 & 0 & j\omega L_4 & -j/\omega C_5 & -r_6 \end{Vmatrix}.$$

Транспонирование матрицы

$$B^{\mathrm{T}}=\begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{Vmatrix}$$

и для $\underline{\mathbf{Z}}^{к}=\mathbf{B}\underline{\mathbf{Z}}^{в}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}$ получается ранее записанная матрица.

Матрицу-столбец контурных ЭДС можно составить, применяя формулу:

$$\underline{\mathbf{E}}^{(к)}=\mathbf{B}\underline{\mathbf{E}}^{(в)}-\mathbf{B}\underline{\mathbf{Z}}^{(в)}\underline{\mathbf{J}}^{(в)},$$

где $\underline{\mathbf{J}}^{(в)}$ — матрица-столбец (вектор) токов источников тока.

Для цепей, которые имеют индуктивно связанные катушки, взаимные индуктивности учитываются в контурных сопротивлениях или уравнения записываются после развязки индуктивных связей.

Пример (рис. 4.10, *а*). Для контурных токов $\underline{I}_1=\underline{I}_I$ и $\underline{I}_{II}=\underline{I}_2$ система уравнений: $\underline{Z}_{11}\underline{I}_1+\underline{Z}_{12}\underline{I}_2=\underline{E}_1$; $\underline{Z}_{21}\underline{I}_1+\underline{Z}_{22}\underline{I}_2=-\underline{E}_2$, где $\underline{Z}_{11}=r_1+j\omega L_1$; $\underline{Z}_{12}=\underline{Z}_{21}=-j\omega L_1+j\omega M$; $\underline{Z}_{22}=j\omega L_2-j/\omega C-j\omega M+j\omega L_1-j\omega M$ (так как контурный ток $\underline{I}_{II}$ направлен в катушках относительно одноименных выводов по-разному).

Метод узловых потенциалов

Для определения потенциалов всех узлов нужно составить систему уравнений по первому закону Кирхгофа для всех узлов, кроме одного, записывая каждый ток по формуле обобщенного закона Ома и принимая потенциал одного из узлов за нулевой. Получается система уравнений для потенциалов.

Пример (рис. 4.8, *а*). Схема имеет четыре узла. Выбирая, например $\underline{\varphi}_d=\underline{\varphi}_4=0$, запишем уравнения по первому закону Кирхгофа для трех любых узлов, например, остальных:

$$-\underline{I}_2+\underline{I}_4+\underline{I}_6=0; \quad -\underline{I}_1+\underline{I}_2+\underline{I}_3=0;$$
$$-\underline{I}_3-\underline{I}_5-\underline{I}_6=0$$

и по обобщенному закону Ома

$$-\frac{1}{r_2}(\underline{\varphi}_2-\underline{\varphi}_1+\underline{E}_2)+\frac{1}{j\omega L_4}(\underline{\varphi}_1-0)+$$
$$+\frac{1}{r_6}(\underline{\varphi}_1-\underline{\varphi}_3-\underline{E}_6)=0;$$
$$-\frac{1}{r_1+j\omega L_1}(0-\underline{\varphi}_2+\underline{E}_1)+\frac{1}{r_2}(\underline{\varphi}_2-\underline{\varphi}_1+\underline{E}_2)+$$
$$+\frac{1}{j\omega L_3}(\underline{\varphi}_2-\underline{\varphi}_3)=0;$$
$$-\frac{1}{j\omega L_3}(\underline{\varphi}_2-\underline{\varphi}_3)-\frac{1}{-j/\omega C_5}(0-\underline{\varphi}_3)-$$
$$-\frac{1}{r_6}(\underline{\varphi}_1-\underline{\varphi}_3-\underline{E}_6)=0.$$

После вычисления потенциалов $\underline{\varphi}_1$, $\underline{\varphi}_2$, $\underline{\varphi}_3$ токи определяются по обобщенному закону Ома.

Если какой-либо ток известен, например ток источника тока, то в уравнениях вместо соответствующего слагаемого надо записать этот ток.

Уравнения по методу узловых потенциалов для каждого k-го из $y-1$ узлов могут быть записаны в виде:

$$\sum_{m=1}^{y-1}\underline{Y}_{km}\underline{\varphi}_m=\sum_k(\underline{Y}\,\underline{E}),$$

где $\underline{Y}_{km}$ — проводимость ветви, соединяющей узлы k и m, взятая со знаком минус; $\underline{Y}_{kk}$ — сумма проводимостей ветвей, присоединенных к узлу k; $\sum_k(\underline{Y}\,\underline{E})$ — алгебраическая сумма произведений ЭДС на проводимость для всех ветвей, присоединенных к k-му узлу; со знаком плюс (минус) записываются ЭДС, направленные к узлу (от узла).

Пример (рис. 4.8, *а*). При $\underline{\varphi}_4=0$ для узлов *1, 2, 3* соответственно

$$\underline{Y}_{11}\underline{\varphi}_1+\underline{Y}_{12}\underline{\varphi}_2+\underline{Y}_{13}\underline{\varphi}_3=\sum_1(\underline{Y}\,\underline{E});$$
$$\underline{Y}_{21}\underline{\varphi}_1+\underline{Y}_{22}\underline{\varphi}_2+\underline{Y}_{23}\underline{\varphi}_3=\sum_2(\underline{Y}\,\underline{E});$$
$$\underline{Y}_{31}\underline{\varphi}_1+\underline{Y}_{32}\underline{\varphi}_2+\underline{Y}_{33}\underline{\varphi}_3=\sum_3(\underline{Y}\,\underline{E}),$$

где $\underline{Y}_{11}=\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_6}+\frac{1}{j\omega L_4}$;

$\underline{Y}_{12}=\underline{Y}_{21}=-\frac{1}{r_2}$; $\underline{Y}_{13}=\underline{Y}_{31}=-\frac{1}{r_6}$;

$\underline{Y}_{22}=\frac{1}{r_1+j\omega L_1}+\frac{1}{r_2}+\frac{1}{j\omega L_3}$;

$\underline{Y}_{23}=\underline{Y}_{32}=-\frac{1}{j\omega L_3}$; $\underline{Y}_{33}=\frac{1}{j\omega L_3}+\frac{1}{-j/\omega C_5}+\frac{1}{r_6}$;

$\sum_1(\underline{Y}\,\underline{E})=\frac{1}{r_2}\underline{E}_2+\frac{1}{r_6}\underline{E}_6$;

$\sum_2(\underline{Y}\,\underline{E})=\frac{1}{r_1+j\omega L_1}\underline{E}_1-\frac{1}{r_2}\underline{E}_2$;

$\sum_3(\underline{Y}\,\underline{E})=-\frac{1}{r_6}E_6$.

Узловые уравнения записываются короче в матричной форме:

$$\underline{\mathbf{Y}}^{(y)}\underline{\boldsymbol{\varphi}}=\underline{\mathbf{J}}^{(y)},$$

где $\underline{\boldsymbol{\varphi}}$ — матрица-столбец искомых потенциалов узлов (кроме одного базисного, потенциал которого принят равным нулю); $\underline{\mathbf{Y}}^{(y)}$ — квадратная матрица узловых проводимостей; $\underline{\mathbf{J}}^{(y)}$ — матрица-столбец узловых токов. Каждый диагональный элемент (или собственная узловая проводимость) $\underline{Y}_{ii}$ матрицы $\underline{\mathbf{Y}}^{(y)}$ равен сумме комплексных проводимостей всех ветвей, присоединенных к этому узлу (i); каждый внедиагональный элемент (или общая узловая проводимость) $\underline{Y}_{ij}=\underline{Y}_{ji}$ равен сумме комплексных проводимостей всех ветвей, соединяющих узлы i и j, и записывается со знаком минус. Элемент $\underline{J}_i^{(y)}$ матрицы узловых токов равен алгебраической сумме токов источников тока, эквивалентных источникам ЭДС в ветвях, присоединенных к узлу i. Направленные к узлу (от узла) токи записываются со знаком плюс (минус). Знаки элементов всех матриц не зависят от ориентации ветвей графа.

Пример. Для схемы рис. 4.8, *а*, принимая $\underline{\varphi}_d=\underline{\varphi}_4=0$, получаем

$$\underline{\mathbf{Y}}^{(y)}=\begin{Vmatrix}\underline{Y}_{11} & -1/r_2 & -1/r_6\\ -1/r_3 & \underline{Y}_{22} & -1/j\omega L_3\\ -1/r_6 & -1/j\omega L_3 & \underline{Y}_{33}\end{Vmatrix},$$

где

$$\underline{Y}_{11}=\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_6}+\frac{1}{j\omega L_4};\qquad \underline{Y}_{22}=\frac{1}{r_1+j\omega L_1}+$$
$$+\frac{1}{r_2}+\frac{1}{j\omega L_3};\qquad \underline{Y}_{33}=\frac{1}{j\omega L_3}+\frac{1}{r_6}+\frac{1}{-j/\omega C_5},$$

$$\underline{\varphi}=\begin{Vmatrix}\underline{\varphi}_1\\ \underline{\varphi}_2\\ \underline{\varphi}_3\end{Vmatrix};$$

$$\underline{\mathbf{J}}^{(y)}=\begin{Vmatrix}\frac{1}{r_2}\underline{E}_2+\frac{1}{r_6}\underline{E}_6\\ \frac{1}{j\omega L_1+r_1}\underline{E}_1-\frac{1}{r_2}\underline{E}_2\\ -\frac{1}{r_6}\underline{E}_6\end{Vmatrix}.$$

Если в какой-либо ветви известен ток, например ток источника тока, то в левых частях уравнений слагаемое с проводимостью этой ветви должно отсутствовать, в правых частях уравнений нужно добавить известный ток со знаком плюс (минус), если он направлен к узлу (от узла).

Матрицу узловых проводимостей $\underline{\mathbf{Y}}^{(y)}$ можно получить и при помощи матрицы соединений $\underline{\mathbf{A}}$:

$$\underline{\mathbf{Y}}^{(y)}=\mathbf{A}\underline{\mathbf{Y}}^{(в)}\mathbf{A}^{\mathrm{T}},$$

где $\underline{\mathbf{Y}}^{(в)}$ — диагональная матрица проводимостей ветвей.

Матрицы напряжений ветвей и узловых потенциалов связаны уравнением

$$\underline{U} = \mathbf{A}^{\mathrm{T}} \underline{\varphi}.$$

Пример. Для схемы рис. 4.8, *а* матрица соединений была получена при составлении уравнений Кирхгофа:

$$A = \begin{Vmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \end{Vmatrix}.$$

Диагональная матрица проводимостей ветвей

$$\underline{Y}^{(\mathrm{B})} = \begin{Vmatrix} 1/(r_1 + j\omega L_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/r_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/j\omega L_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/j\omega L_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & j\omega C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/r_6 \end{Vmatrix}.$$

Произведение

$$\underline{A}\underline{Y}^{(\mathrm{B})} = \begin{Vmatrix} 0 & -1/r_2 & 0 & 1/j\omega L_4 & 0 & 1/r_6 \\ -1/(r_1 + j\omega L_1) & 1/r_2 & 1/j\omega L_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/j\omega L_3 & 0 & -j\omega C_5 & -1/r_6 \end{Vmatrix}.$$

Транспонированная матрица

$$A^{\mathrm{T}} = \begin{Vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{Vmatrix}$$

и для $\underline{Y}^{(\mathrm{y})} = \underline{A}\underline{Y}^{(\mathrm{B})} A^{\mathrm{T}}$ получается ранее записанная матрица.

Матрицу-столбец узловых токов также можно получить при помощи матрицы соединений A:

$$\underline{J}^{(\mathrm{y})} = \underline{A}\underline{J}^{(\mathrm{B})} - \underline{A}\underline{Y}^{(\mathrm{B})} \underline{E}^{(\mathrm{B})},$$

где $\mathbf{J}^{(\mathrm{B})}$ — матрица-столбец токов источников тока; $\underline{E}^{(\mathrm{B})}$ — матрица-столбец ЭДС в ветвях.

Пример. Для схемы рис. 4.8, *а*, в которой источники тока отсутствуют, произведение $\underline{A}\underline{Y}^{(\mathrm{B})}$ было уже получено и для $\underline{J}^{(\mathrm{y})} = -\underline{A}\underline{Y}^{(\mathrm{B})} \underline{E}^{(\mathrm{B})}$ получается ранее записанная матрица.

Для цепей, содержащих индуктивно связанные ветви, матрица проводимостей ветвей $\underline{Y}^{(\mathrm{B})}$ недиагональная и определяется как обратная матрица сопротивлений ветвей $\underline{Z}^{(\mathrm{B})}$, т. е. $\underline{Y}^{(\mathrm{B})} = (\underline{Z}^{(\mathrm{B})})^{-1}$.

У матрицы $\underline{Z}^{(\mathrm{B})}$ элементы главной диагонали — сопротивления ветвей, а остальные элементы — сопротивления индуктивной связи между соответствующими ветвями (равны нулю, если между соответствующими ветвями нет индуктивной связи). Эти сопротивления $j\omega M_{mn}$ записываются со знаком плюс (минус), если токи в ветвях m и n направлены одинаково (противоположно) относительно одноименных выводов.

Расширенные узловые уравнения [1]

Уравнения с однородными переменными (узловыми потенциалами и контурными токами) не универсальны по отношению к способу описания элементов схемы. Так, уравнения с узловыми потенциалами можно непосредственно, т. е. без преобразования схемы, составить, если ветви имеют конечные проводимости, а многополюсники — матрицы проводимостей. Таким условиям не удовлетворяют, например, идеальные источники ЭДС, короткозамкнутые управляющие ветви зависимых источников; из четырех типов зависимых источников (рис. 4.6, *г*—*ж*) только у одного — источника тока, управляемого напряжением (рис. 4.6, *е*), существует матрица проводимостей (см. «Управляемые источники»). Аналогично уравнения с контурными токами можно непосредственно составить, если ветви имеют конечные сопротивления, а многополюсники — матрицы сопротивлений.

Бо́льшую универсальность, особенно в случае применения машинного расчета электрических цепей, имеют расширенные узловые уравнения.

При составлении расширенных узловых уравнений все множество ветвей схемы делится на два подмножества: y-ветви, характеризуемые проводимостью, и z-ветви, характеризуемые сопротивлением. На рис. 4.13, *а* приведена обобщенная y-ветвь, содержащая двухполюсник с проводимостью $\underline{Y}_i$, независимый источник тока $\underline{J}_i$ и зависимые ИТУН $\underline{Y}_{ij}\underline{U}_j$ и ИТУТ $\underline{K}_{ik}\underline{I}_k$; ее уравнение

$$\underline{I}_i = \underline{Y}_i \underline{U}_i + \underline{Y}_{ij} \underline{U}_j + \underline{K}_{ik} \underline{I}_k - \underline{J}_i.$$

Обобщенная z-ветвь изображена на рис. 4.13, *б*; она содержит двухполюсник с сопротивлением $\underline{Z}_l$, независимый источник ЭДС $\underline{E}_l$ и зависимые ИНУТ $\underline{Z}_{lm}\underline{I}_m$ и ИНУН $\underline{N}_{ln}\underline{U}_n$; ее уравнение

$$\underline{U}_l = \underline{Z}_l \underline{I}_l + \underline{Z}_{lm} \underline{I}_m + \underline{N}_{ln} \underline{U}_n - \underline{E}_l.$$

Объединяя эти уравнения для всех y- и z-ветвей, получаем матричные уравнения:

$$\underline{\mathbf{I}}_Y = \underline{\mathbf{Y}}\underline{\mathbf{U}}_Y + \underline{\mathbf{K}}\underline{\mathbf{I}}_Z - \underline{\mathbf{J}};$$

$$\underline{\mathbf{U}}_Z = \underline{\mathbf{Z}}\,\underline{\mathbf{I}}_Z + \underline{\mathbf{N}}\,\underline{\mathbf{U}}_Y - \underline{\mathbf{E}},$$

где $\underline{\mathbf{I}}_Y$, $\underline{\mathbf{U}}_Y$, $\underline{\mathbf{I}}_Z$, $\underline{\mathbf{U}}_Z$, $\underline{\mathbf{J}}$, $\underline{\mathbf{E}}$ — матрицы-столбцы (векторы) токов, напряжений и ЭДС; $\underline{\mathbf{Y}}$ — мат-

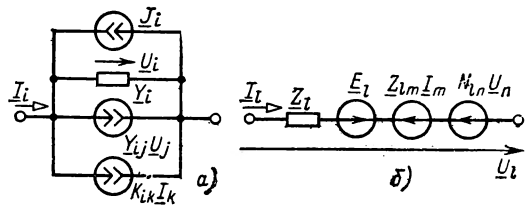


Рис. 4.13

[1] Подпараграф «Расширенные узловые уравнения» написан В. Г. Мироновым.

рица проводимости y-ветвей; $\underline{\mathbf{Z}}$ — матрица сопротивлений z-ветвей; $\underline{\mathbf{K}}$ — матрица параметров всех ИТУТ; $\underline{\mathbf{N}}$ — матрица параметров всех ИНУН.

Матричные уравнения записаны в предположении, что управляющими по току (по напряжению) служат z-ветви (y-ветви), которые в частном случае могут быть короткозамкнутыми (разомкнутыми). Параметры ИТУН учитываются в матрице $\underline{\mathbf{Y}}$, параметры ИНУТ — в матрице $\underline{\mathbf{Z}}$.

При делении всех ветвей на два подмножества матричное уравнение по первому закону Кирхгофа имеет вид:

$$\mathbf{A}_Y \underline{I}_Y + \mathbf{A}_Z \underline{I}_Z = 0,$$

где $\mathbf{A}_Y$, $\mathbf{A}_Z$ — подматрицы узловой матрицы $\mathbf{A}$, соответствующие y- и z-ветвям. Подставляя последнее соотношение в матричные уравнения и учитывая равенства

$$\underline{U}_Y = \mathbf{A}_Y^{\mathrm{T}} \underline{\varphi}, \quad \underline{U}_Z = \mathbf{A}_Z^{\mathrm{T}} \underline{\varphi},$$

получаем расширенное узловое уравнение (в матричной форме):

$$\begin{Vmatrix} \underline{\mathbf{A}}_Y \underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{A}}_Y^{\mathrm{T}} & \underline{\mathbf{A}}_Y \underline{\mathbf{K}} + \underline{\mathbf{A}}_Z \\ \underline{\mathbf{N}} \underline{\mathbf{A}}_Y^{\mathrm{T}} - \underline{\mathbf{A}}_Z^{\mathrm{T}} & \underline{\mathbf{Z}} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \underline{\varphi} \\ \underline{I}_Z \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \underline{\mathbf{A}}_Y \underline{I} \\ \underline{\mathbf{E}} \end{Vmatrix}.$$

В отличие от обычных уравнений с узловыми потенциалами переменными в расширенном уравнении служат не только потенциалы узлов, но и токи z-ветвей. В частном случае, когда все ветви схемы можно рассматривать как y-ветви, это уравнение становится обычным уравнением с узловыми потенциалами.

Расширенное уравнение просто формируется на ЭВМ без выполнения операций умножения матриц. В табл. 4.2 приведены двухполюсные элементы схемы и управляемые источники, а также составляющие матрицы коэффициентов и матриц-столбцов правой части расширенного уравнения, обусловленные этими элементами и управляемыми источниками. Все составляющие записаны при условии, что ни один из записанных узлов не совпадает с базисным (заземленным) узлом. Формирование матрицы коэффициентов и матрицы-столбца правой части сводится к суммированию составляющих, обусловленных каждым элементом.

Составляющие в табл. 4.2 записаны в предположении, что вначале составляются уравнения (по первому закону Кирхгофа) для узлов, а затем уравнения для z-ветвей. Соответственно матрица-столбец переменных содержит вначале узловые потенциалы всех узлов, кроме базисного, затем токи z-ветвей. Изменение нумерации узлов или z-ветвей приводит к соответствующей перестановке строк и столбцов, записанных в табл. 4.2 составляющих.

Следует учесть, что один из узлов двухполюсников *1* и *2* в табл. 4.2 может совпадать с базисным узлом; в управляемых источниках *3*—*6* с базисным узлом могут совпадать один или два узла. Если узел j (или узел k) элемента *1* совпадает с базисным узлом, то в составляющей матрицы коэффициентов отсутствуют строка и столбец с номером j (или с номером k); в составляющей матрицы-столбца правой

Таблица 4.2. **Элементы схемы и составляющие матриц расширенного узлового уравнения**

Элемент схемы	Составляющая матрицы коэффициентов	Составляющая вектора правой части
1	$\begin{matrix} & j & k \\ j & Y_i & -Y_i \\ k & -Y_i & Y_i \end{matrix}$	$\begin{matrix} & J_i \\ j & J_i \\ k & -J_i \end{matrix}$
2	$\begin{matrix} & j & k & i \\ j & & & 1 \\ k & & & -1 \\ i & -1 & 1 & Z \end{matrix}$	$\begin{matrix} & E_i \\ j & \\ k & \\ i & E_i \end{matrix}$
3	$\begin{matrix} & j_1 & j_2 & k_1 & k_2 \\ j_1 & & & Y_{kj} & -Y_{kj} \\ j_2 & & & -Y_{kj} & Y_{kj} \end{matrix}$	—
4	$\begin{matrix} & j_1 & j_2 & k_1 & k_2 & j \\ j_1 & & & & & 1 \\ j_2 & & & & & -1 \\ k_1 & & & & & K_{kj} \\ k_2 & & & & & -K_{kj} \\ j & 1 & -1 & & & \end{matrix}$	—
5	$\begin{matrix} & j_1 & j_2 & k_1 & k_2 & j & k \\ j_1 & & & & & 1 & \\ j_2 & & & & & -1 & \\ k_1 & & & & & & -1 \\ k_2 & & & & & & 1 \\ j & 1 & -1 & & & & \\ k & & & -1 & 1 & Z_{kj} & \end{matrix}$	—
6	$\begin{matrix} & j_1 & j_2 & k_1 & k_2 & k \\ j_1 & & & & & & \\ j_2 & & & & & & \\ k_1 & & & & & & -1 \\ k_2 & & & & & & 1 \\ k & & & N_{kj} & -N_{kj} & -1 & 1 \end{matrix}$	—

части отсутствует строка j (или строка k). Аналогично изменяются составляющие, обусловленные элементом 2, если один из узлов этого элемента совпадает с базисным. При условии, что узел j_i или (и) k_i ($i=1, 2$) управляемого источника совпадает с базисным, соответствующая составляющая матрицы коэффициентов не будет содержать строку j_i или (и) k_i, а также столбец j_i или (и) k_i.

Применение топологических методов расчета

При определении потенциалов из узловых уравнений необходимо вычислить определитель $\underline{D}^{(y)}$ матрицы узловых проводимостей $\underline{\mathbf{Y}}^{(y)}$. Расчеты упрощаются, если применяется разложение определителя. Разложение по ветви применяется для любой ветви, соединяющей какой-либо узел j с базисным,

$$\underline{D}^{(y)} = \underline{Y}_j \underline{D}_j + \underline{D}^j,$$

где минор $\underline{D}_j$ получается вычеркиванием j-й строки и j-го столбца определителя $\underline{D}^{(y)}$; нижний индекс у минора 1-го слагаемого означает, что j-я ветвь закорочена; определитель $\underline{D}^j$ получается из $\underline{D}^{(y)}$ при $\underline{Y}_j=0$, т. е. верхний индекс у 2-го слагаемого означает, что та же ветвь разомкнута; так как проводимость $\underline{Y}_j$ входит в элемент $\underline{D}^{(y)}$, стоящий на главной диагонали, то минор равен алгебраическому дополнению (положительному).

Пример. Для схемы рис. 4.8, *а* при $\varphi_4=0$ определитель узловой проводимости составляется так же, как матрица узловых проводимостей (см. «Метод узловых потенциалов»). Разложим определитель относительно ветви с L_4, присоединенной к базисному узлу 4:

Обобщая, получаем общее выражение для разложения определителя по всем ветвям, присоединенным к базисному узлу, т. е. разложение по узлу:

$$\underline{D}^{(y)} = \Sigma \underline{Y}_i \underline{D}_i + \Sigma \underline{Y}_i \underline{Y}_j \underline{D}_{ij} + \Sigma \underline{Y}_i \underline{Y}_j \underline{Y}_k \underline{D}_{ijk} + \ldots + \underline{Y}_1 \underline{Y}_2 \ldots \underline{Y}_m,$$

где m—число ветвей, присоединенных к базисному узлу; верхние индексы, указывающие номера разомкнутых ветвей, опущены, так как нижние индексы определяют и закороченные, и разомкнутые ветви. Например, слагаемое $\underline{Y}_i\underline{D}_i$ соответствует схеме с i-й закороченной ветвью и с разомкнутыми остальными ветвями; число таких слагаемых равно m. Слагаемое вида $\underline{Y}_i\underline{Y}_j\underline{D}_{ij}$ соответствует схеме с двумя закороченными ветвями i и j и остальными разомкнутыми; число таких слагаемых равно числу сочетаний по 2 из m и т. д.

При вычислении определителя $\underline{D}^{(k)}$ матрицы контурных сопротивлений $\underline{\mathbf{Z}}^{(k)}$ можно пользоваться аналогичными разложениями для диагональных элементов матрицы:

$$\underline{D}^{(k)} = \underline{Z}_l \underline{D}_l + \underline{D}^l$$

где минор $\underline{D}_l$ получается вычеркиванием l-й строки и l-го столбца и соответствует электрической схеме, в которой ветвь с сопротивлением $\underline{Z}_l$ разомкнута; определитель $\underline{D}^l$ получается из $\underline{D}^{(k)}$ при $\underline{Z}_l=0$.

$$\underline{D}^{(y)} = \frac{1}{j\omega L_4}\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{r_1+j\omega L_1}+\frac{1}{r_2}+\frac{1}{j\omega L_3}\right) & -\frac{1}{j\omega L_3} \\ -\frac{1}{j\omega L_3} & \frac{1}{j\omega L_3}+\frac{1}{-j/\Sigma C_5}+\frac{1}{r_6} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \left(\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_6}\right) & -\frac{1}{r_2} & -\frac{1}{r_6} \\ -\frac{1}{r_2} & \left(\frac{1}{r_1+j\omega L_1}+\frac{1}{r_2}+\frac{1}{j\omega L_3}\right) & -\frac{1}{j\omega L_3} \\ -\frac{1}{r_6} & -\frac{1}{j\omega L_3} & \left(\frac{1}{j\omega L_3}+\frac{1}{-j/\omega C_5}+\frac{1}{r_6}\right) \end{vmatrix} = \underline{Y}_4 \underline{D}_4 + \underline{D}^4.$$

Можно далее разложить, например, D^4 относительно проводимости ветви 1:

$$\underline{D}^4 = \frac{1}{r_1+j\omega L_4}\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_6}\right) & -\frac{1}{r_6} \\ -\frac{1}{r_6} & \left(\frac{1}{j\omega L_3}+\frac{1}{-j/\omega C_5}+\frac{1}{r_6}\right) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \left(\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_6}\right) & -\frac{1}{r_2} & -\frac{1}{r_6} \\ -\frac{1}{r_2} & \left(\frac{1}{r_2}+\frac{1}{j\omega L_3}\right) & -\frac{1}{j\omega L_3} \\ -\frac{1}{r_6} & -\frac{1}{j\omega L_3} & \left(\frac{1}{j\omega L_3}+\frac{1}{-j/\omega C_5}+\frac{1}{r_6}\right) \end{vmatrix} = \underline{Y}_1 \underline{D}_1^4 + \underline{D}^{41}$$

и аналогично проделать дальнейшие разложения.

Пример. Для схемы рис. 4.8, *а* определитель $\underline{D}^{(к)}$ составляется так же, как матрица контурных сопротивлений (см. «Метод контурных токов»). При разложении относительно ветви с сопротивлением r_6:

$$\underline{D}^{(к)} = r_6 \begin{vmatrix} (r_1 + j\omega L_1 + r_2 + j\omega L_4) & -r_2 \\ -r_2 & (r_2 + j\omega L_3 + r_6) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} (r_1 + j\omega L_1 + r_2 + j\omega L_4) & -r_2 & j\omega L_4 \\ -r_2 & (r_2 + j\omega L_3 + r_6) & r_6 \\ j\omega L_4 & r_6 & (j\omega L_4 - j/\omega C_5) \end{vmatrix} = r_6 \underline{D}_6 + \underline{D}^6;$$

дальнейшие разложения аналогичны.

Взаимная эквивалентная замена источников тока и ЭДС

В любой ветви *а*, соединяющей два узла (*1* и *2*), ЭДС $\underline{E}_a$ можно заменить узловым током (током источника) $\underline{J}$. Ток источника направлен к тому из узлов (*1*), в сторону которого действует ЭДС (рис. 4.14, *а*): $\underline{J} = \underline{Y}_a \underline{E}_a$, где $\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a$ — проводимость ветви *а*.

Правила переноса источников ЭДС и тока даны на рис. 4.14, *б* и *в*.

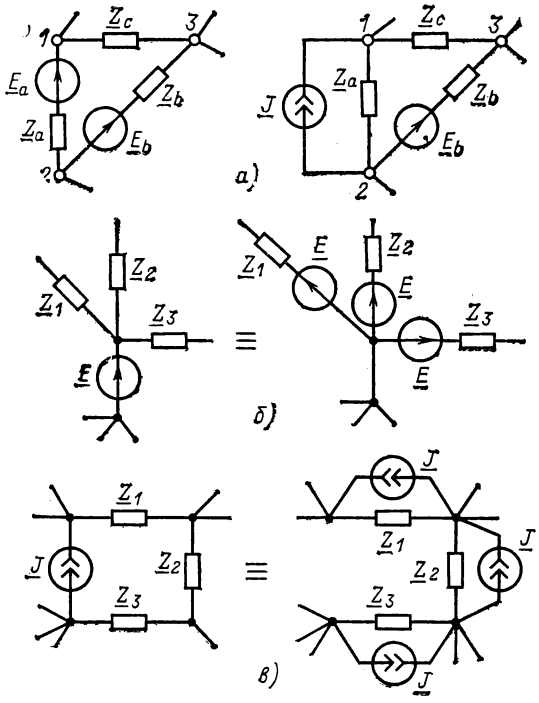


Рис. 4.14

Метод активного двухполюсника

1. Ток в любой ветви (рис. 4.15, *а*) $\underline{I} = \underline{U}_x/(\underline{Z} + \underline{Z}_{вх})$, где $\underline{Z}$ — сопротивление ветви; $\underline{U}_x = \underline{U}_{аб} = \underline{\varphi}_a - \underline{\varphi}_б$ — напряжение при отключении ветви с сопротивлением $\underline{Z}$, в которой определяется ток; $\underline{Z}_{вх}$ — входное сопротивление двухполюсника, т. е. сопротивление всей цепи, кроме ветви, в которой определяется ток, измеренное на выводах *аб*, когда все ЭДС приняты равными нулю, а все ветви с источниками тока разомкнуты. При $\underline{Z} = 0$

$$\underline{I} = \underline{I}_к = \underline{U}_x/\underline{Z}_{вх}; \quad \underline{Z}_{вх} = \underline{U}_x/\underline{I}_к,$$

где $\underline{I}_к$ — ток короткого замыкания ветви.

Пример (рис. 4.15, *б*). Определяется ток $\underline{I}_2$. Сначала находим $\underline{U}_x = \underline{\varphi}_в - \underline{\varphi}_а$ при разомкнутом участке *ав* (рис. 4.15, *в*). Чтобы найти $\underline{\varphi}_б$, вычислим ток:

$$\underline{I}_x = \underline{E}_1/(r - jx_C).$$

Пусть $\underline{\varphi}_a = 0$, тогда $\underline{\varphi}_б = 0 - \underline{I}_x(-jx_C)$;

$$\underline{\varphi}_в = \underline{\varphi}_б - \underline{E}_2; \quad \underline{U}_x = jx_C \underline{I}_x - \underline{E}_2.$$

Входное сопротивление относительно точек *ав* и ток $\underline{I}_2$:

$$\underline{Z}_{вх} = \frac{r(-jx_C)}{r - jx_C}; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_x}{\underline{Z}_{вх} + jx_L}.$$

2. Параллельные, содержащие источники ЭДС ветви, могут быть заменены одним источником ЭДС и одним сопротивлением по формулам

$$\underline{E}_{эк} = \frac{\Sigma \underline{E}_k \underline{Y}_k}{\Sigma \underline{Y}_k}; \quad 1/\underline{Z}_{эк} = \underline{Y}_{эк} = \Sigma \underline{Y}_k,$$

где $k = 1, 2, \ldots, n$ (n — число параллельных ветвей).

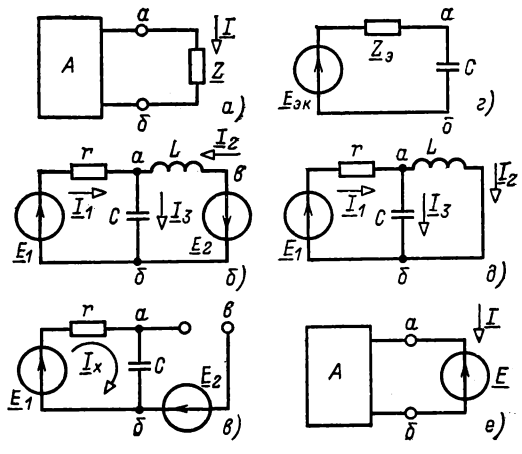


Рис. 4.15

ЭДС, положительные направления которых совпадают с выбранным положительным направлением эквивалентной ЭДС, записываются в формуле со знаком плюс, а имеющие противоположное направление — со знаком минус.

Пример (рис. 4.15, *б* и *г*). Заменяются две ветви с ЭДС $\underline{E}_1$ и $\underline{E}_2$:

$$\underline{E}_{эк} = \frac{\underline{E}_1/r_1 - \underline{E}_2/j\omega L}{1/r + 1/j\omega L}; \quad \underline{Y}_{эк} = \frac{1}{r} + \frac{1}{j\omega L}.$$

Метод наложения

Ток в каждой ветви рассчитывается как алгебраическая сумма токов, возникающих в этой ветви от действия каждого из источников ЭДС или тока в отдельности. Оставляя каждый раз один источник ЭДС или тока, необходимо сохранять все сопротивления (во всех ветвях):

$$\underline{I}_k = \underline{Y}_{k1}\underline{E}_1 + \underline{Y}_{k2}\underline{E}_2 + \ldots + \underline{Y}_{kk}\underline{E}_k + \ldots + \underline{Y}_{kn}\underline{E}_n + \underline{H}_{kp}\underline{J}_p + \ldots + \underline{H}_{ks}\underline{J}_s,$$

где $\underline{I}_k$ — ток в k-й ветви; $\underline{E}_1$, $\underline{E}_2$... — ЭДС 1-й, 2-й... ветвей; $\underline{Y}_{kn}$ — взаимная проводимость ветви k и n; $\underline{Y}_{kk}$ — входная проводимость ветви k; $\underline{J}_p$, ..., $\underline{J}_s$ — токи источников в p-й, ..., s-й ветвях; $\underline{H}_{kp}$, ..., $\underline{H}_{ks}$ — передаточные коэффициенты k-й и соответственно p-й, ..., s-й ветвей.

По определению $\underline{Y}_{kn}=\underline{I}_k/\underline{E}_n$, когда все ЭДС, кроме $\underline{E}_k$, равны нулю и все ветви с источниками тока разомкнуты; $\underline{H}_{kp}=\underline{I}_k/\underline{J}_p$, когда все ЭДС равны нулю и разомкнуты все ветви с источниками тока, кроме ветви p.

Пример (рис. 4.15,*б*): $\underline{I}_3=\underline{Y}_{31}\underline{E}_1+\underline{Y}_{32}\underline{E}_2$. Для определения, например, $\underline{Y}_{31}=\underline{I}_3/\underline{E}_1$ оставляем в схеме только ЭДС $\underline{E}_1$ (рис. 4.15, *д*). Так как

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1}{r + jx_L(-jx_C)/(jx_L - jx_C)};$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_1 \frac{jx_L}{jx_L - jx_C},$$

то

$$\frac{\underline{I}_3}{\underline{E}_1} = \underline{Y}_{31} = \frac{x_L}{r(x_L - x_C) - jx_L x_C}.$$

Схема линейная, поэтому при расчетах взаимных проводимостей можно положить $\underline{E}_1=1$ В. Для вычисления взаимных проводимостей (и передаточных коэффициентов) применяют также метод подобия (см. ниже).

Преобразования схем соединения элементов треугольником и звездой

При замене соединения элементов треугольником соединением звездой сохраняются неизменными токи и напряжения для всех участков цепи, кроме преобразуемых элементов (рис. 4.16).

Формулы преобразования соединения элементов треугольником в соединение звездой:

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{12}\underline{Z}_{31}/\Sigma\underline{Z};\quad \underline{Z}_2 = \underline{Z}_{23}\underline{Z}_{12}/\Sigma\underline{Z};$$

$$\underline{Z}_3 = \underline{Z}_{31}\underline{Z}_{23}/\Sigma\underline{Z},$$

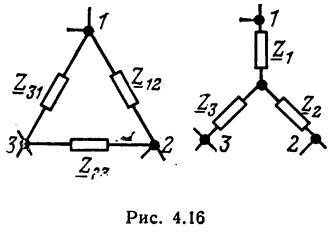


Рис. 4.16

где $\Sigma\underline{Z} = \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}$.

Формулы преобразования соединения элементов звездой в соединение треугольником:

$$\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_1\underline{Y}_2/\Sigma\underline{Y};\quad \underline{Y}_{23} = \underline{Y}_2\underline{Y}_3/\Sigma\underline{Y};$$

$$\underline{Y}_{31} = \underline{Y}_3\underline{Y}_1/\Sigma\underline{Y},$$

где $\Sigma\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3$; $\underline{Y}_{12} = 1/\underline{Z}_{12}$; $\underline{Y}_1 = 1/\underline{Z}_1$ и т. д.

Метод подобия

Если цепь содержит один источник ЭДС или тока, то можно рассчитать все токи без составления системы уравнений. Предполагая ток $\underline{I}_0$ в одной из ветвей известным и равным, например 1 А, определяем токи во всех ветвях и значение ЭДС или тока источника, действующего вместо заданного, чтобы получить ток 1 А. Пользуясь свойством линейности цепи, из пропорций находим токи, возникающие при действии заданной ЭДС или заданного источника тока.

Пример (рис. 4.17). Пусть $I_{20}=1$А. Тогда $\underline{U}_{аб}=j\omega L\cdot 1$; $\underline{I}_{30}=\underline{U}_{аб}j\omega C$; $\underline{I}_{10}=\underline{I}_{30}+\underline{I}_{20}=-\omega^2LC+1$; $\underline{E}_0=r\underline{I}_{10}+\underline{U}_{аб}=-\omega^2LCr+r+j\omega L$; $\underline{E}/\underline{E}_0=\underline{p}$.

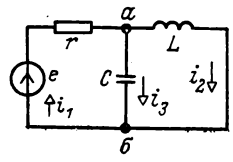


Рис. 4.17

Действительные токи $\underline{I}_k=\underline{p}I_{k0}$, где $k=1, 2, 3$.

Этот метод можно успешно применять при вычислении взаимных проводимостей и передаточных коэффициентов.

Пример (рис. 4.15, *б*). Для определения $\underline{Y}_{31}=-\underline{Y}_{18}$ оставляем в схеме только ЭДС $\underline{E}_1$ (рис. 4.15, *д*) и задаем ток $\underline{I}_3$. Тогда $\underline{U}_{аб}=-jx_C\underline{I}_3$; $\underline{I}_2=\underline{U}_{аб}/jx_L=-\underline{I}_3x_C/x_L$; $\underline{I}_1=\underline{I}_3+\underline{I}_2=\underline{I}_3(1-x_C/x_L)$; $\underline{E}_1=r\underline{I}_1+\underline{U}_{аб}=r(1-x_C/x_L)\underline{I}_3-jx_C\underline{I}_3$;

$$\underline{Y}_{31}=\underline{I}_3/\underline{E}_1=\frac{x_L}{r(x_L-x_C)-jx_Lx_C}.$$

Метод подобия требует иногда предварительного преобразования соединений элементов треугольником в соединения звездой или обратно.

Если цепь содержит несколько источников ЭДС и тока, то метод подобия надо сочетать с методом наложения.

Принцип компенсации

Любой участок с падением напряжения $\underline{Z}\underline{I}$ можно заменить источником ЭДС $\underline{E}=\underline{Z}\underline{I}$, положительное направление которой противоположно положительному направлению тока (рис. 4.15, *а* и *е*). При такой замене сохраняется распределение токов и потенциалов в цепи. Если

сопротивление $\underline{Z}$ изменяется, то изменяются ток $\underline{I}$ и ЭДС $\underline{E}$.

Теорема вариаций

В электрической цепи изменение сопротивления в какой-либо ветви q на $\Delta\underline{Z}_q$ вызывает изменение тока $\underline{I}_p$ в ветви p на $\underline{\Delta I}_p$, причем

$$\Delta\underline{I}_p = \underline{I}_{q0}\,\underline{Y}_{pq}\,\Delta\underline{Z}_q/(1+\underline{Y}_{qq}\,\Delta\underline{Z}_q),$$

где I_{q0} — ток в ветви q; $\underline{Y}_{pq}$ — взаимная проводимость ветвей p и q; $\underline{Y}_{qq}$ — входная проводимость ветви q. Значения всех величин измерены или вычислены при $\Delta\underline{Z}_q=0$.

Теорема взаимности

Если в цепи действует только *одна* ЭДС $\underline{E}_a$ в ветви a и при этом в ветви $б$ ток равен $\underline{I}_б$, то при переносе этой ЭДС в ветвь $б$ в ветви a ток $\underline{I}_a$ будет равен току $\underline{I}_б$, который раньше был в ветви $б$.

Линейные соотношения

При изменении сопротивления, ЭДС или тока источника в одной-единственной ветви цепи все токи и напряжения попарно связаны линейными зависимостями вида $y=a+bx$, где x и y — ток любой ветви или напряжение между любыми точками, a и b — постоянные. Линейная зависимость при изменении тех же величин в двух ветвях имеет вид: $z=a+bx+cy$, где z — также ток или напряжение.

Пример. При изменении индуктивного сопротивления в схеме рис. 4.15, $б$ между токами $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_3$ сохраняется линейная зависимость $\underline{I}_1=a+b\underline{I}_3$.

Для вычисления коэффициентов a и b необходимо найти токи $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_3$ при двух значениях x_L, например при $x_L\to\infty$ и $x_L=0$. При $x_L\to\infty$ (рис. 4.15,$в$) $\underline{I}_1=\underline{I}_3=\underline{I}_x=\underline{E}_1/(r_1-j\underline{x}_C)$. При $x_L=0$ (короткое замыкание между точками a и $в$ на рис. 4.15, $б$) $\underline{I}_1=(\underline{E}_1+\underline{E}_2)/r$; $\underline{I}_3=-\underline{E}_2/(-j\underline{x}_C)$.

Составляем два уравнения:

$$\underline{E}_1/(r-j\underline{x}_C)=a+b\underline{E}_1/(r-j\underline{x}_C);$$

$$(\underline{E}_1+\underline{E}_2)/r=a+b\underline{E}_2/j\underline{x}_C,$$

из которых определяются коэффициенты a и b.

Передаточная функция

В цепи с одним источником энергии, в частности предназначенной для передачи и преобразования сигналов (информации), отношение величины, которая принята выходной, к заданной (входной, известной) определяется передаточной (схемной, системной) функцией H цепи. Например, в комплексной форме $\underline{H}_I=\underline{I}_k/\underline{I}_m$; $\underline{H}_U=\underline{U}_k/\underline{U}_m$; $\underline{H}_Z=\underline{U}_k/\underline{I}_m$; $\underline{H}_Y=\underline{I}_k/\underline{U}_m$, где индекс k относится к выходной величине, а индекс m — к входной.

В частности, взаимные проводимости, передаточные коэффициенты и т. п. можно рассматривать как передаточные функции.

Пример. Для цепи рис. 4.17 передаточная функция между током $\underline{I}_2$ и током источника $\underline{I}_1$

$$\underline{I}_2=\underline{H}_I\,\underline{I}_1,$$

где

$$\underline{H}_I=\frac{1/j\omega C}{j\omega L+1/j\omega C}.$$

При изменении частоты тока, ЭДС или напряжения источника

$$\underline{H}=H(j\omega)=H(\omega)\,e^{j\psi(\omega)},$$

где $H(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика; $\psi(\omega)$ — фазо-частотная характеристика; $H(j\omega)$ — амплитудно-фазовая характеристика (на комплексной плоскости — годограф). Если $H(j\omega)$ — безразмерная величина, то $\ln H(j\omega)=\ln H(\omega)+j\psi(\omega)$ — логарифмическая амплитудно-фазовая характеристика.

Об обозначении напряжений на схемах

Для уточнения записи законов Кирхгофа и обобщенного закона Ома всегда необходимо указывать на схемах положительные направления токов и ЭДС. Записывая напряжения, следует указывать индексами, какое напряжение записано:

$$\underline{U}_{аб}=\underline{\varphi}_a-\underline{\varphi}_б \quad \text{или} \quad \underline{U}_{бa}=\underline{\varphi}_б-\underline{\varphi}_a$$

(рис. 4.18);

$$\underline{U}_{аб}=-\underline{U}_{бa}=\underline{E}+\underline{Z}\underline{I} \text{ (рис. 4.18,}a\text{)}$$

$$\underline{U}_{аб}=-\underline{U}_{бa}=-\underline{E}+\underline{Z}\underline{I} \text{ (рис. 4.18,}б\text{).}$$

Стрелки для ЭДС ставятся иногда не внутри обозначения источника, а рядом с ним.

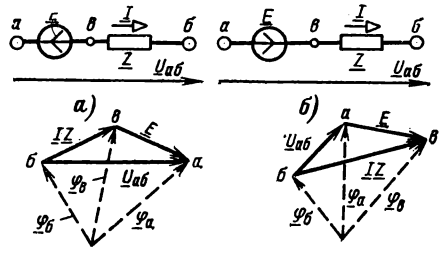


Рис. 4.18

Сигнальные графы

Любую систему линейных уравнений, описывающую режим линейной электрической цепи, можно наглядно изобразить в виде сигнального графа, который состоит из узлов и соединяющих узлы направленных ветвей. Узлы отображают зависимые переменные величины цепи (токи ветвей и напряжения на участках) и независимые (ЭДС и токи источников), ветви — коэффициенты при переменных в системе уравнений.

Для построения графа по системе уравнений каждая зависимая переменная представляется как функция всех других переменных (независимых и зависимых). Например, для схемы

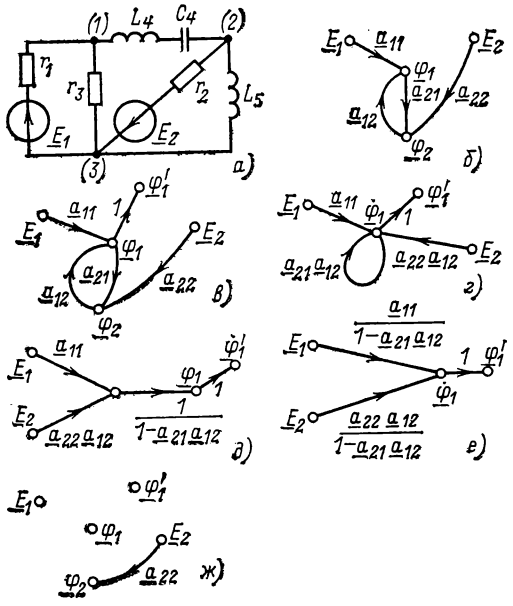


Рис. 4.19

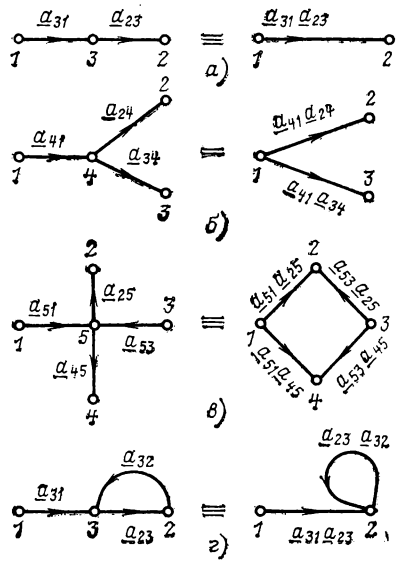


Рис. 4.20

рис. 4.19, *а* по методу узловых потенциалов при $\underline{\varphi}_3=0$ получаются уравнения:

$$\underline{Y}_{11}\underline{\varphi}_1+\underline{Y}_{12}\underline{\varphi}_2=\underline{Y}_1\underline{E}_1; \quad (1)$$

$$\underline{Y}_{21}\underline{\varphi}_1+\underline{Y}_{22}\underline{\varphi}_2=-\underline{Y}_2\underline{E}_2, \quad (2)$$

где

$$\underline{Y}_{11}=\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_3}+\frac{1}{j(\omega L_4-1/\omega C_4)};$$

$$\underline{Y}_{12}=\underline{Y}_{21}=-\frac{1}{j(\omega L_4-1/\omega C_4)};$$

$$\underline{Y}_{22}=\frac{1}{r_2}+\frac{1}{j(\omega L_4-1/\omega C_4)}+\frac{1}{j\omega L_5};$$

$$\underline{Y}_1=\frac{1}{r_1};\quad \underline{Y}_2=\frac{1}{r_2}.$$

Из уравнения (1) определяется потенциал $\underline{\varphi}_1$ первого узла, а из уравнения (2) — потенциал $\underline{\varphi}_2$ второго:

$$\underline{\varphi}_1=\underline{a}_{11}\underline{E}_1+\underline{a}_{12}\underline{\varphi}_2; \quad (3)$$

$$\underline{\varphi}_2=\underline{a}_{22}\underline{E}_2+\underline{a}_{21}\underline{\varphi}_1, \quad (4)$$

где $\underline{a}_{11}=\underline{Y}_1/\underline{Y}_{11}$; $\underline{a}_{12}=-\underline{Y}_{12}/\underline{Y}_{11}$; $\underline{a}_{21}=-\underline{Y}_{21}/\underline{Y}_{22}$; $\underline{a}_{22}=-\underline{Y}_2/\underline{Y}_{22}$; здесь следует иметь в виду, что $\underline{a}_{12}\neq\underline{a}_{21}$.

Уравнения (1), (2) или (3), (4) содержат две зависимые ($\underline{\varphi}_1$, $\underline{\varphi}_2$) и две независимые ($\underline{E}_1$, $\underline{E}_2$) переменные. Поэтому граф имеет четыре узла (рис. 4.19, *б*). Ветвь соединяет соответствующие узлы, если коэффициент, который определяет передачу ветви, $\underline{a}_{ik}\neq 0$, и направлена к узлу i.

В общем случае граф имеет узлы-истоки, к которым присоединены только выходящие ветви ($\underline{E}_1$ и $\underline{E}_2$ на рис. 4.19, *б*), промежуточные узлы с входящими и выходящими ветвями ($\underline{\varphi}_1$ и $\underline{\varphi}_2$ на рис. 4.19, *б*) и узлы-стоки, к которым присоединены только входящие ветви. В сток можно преобразовать любой промежуточный узел, добавляя ветвь с единичной передачей. Например, у графа рис. 4.19, *в*, эквивалентного графу рис. 4.19, *б*, есть сток $\underline{\varphi}_1'=\underline{\varphi}_1$.

Для определения искомой величины, например потенциала $\underline{\varphi}_1$, надо исключить из системы уравнений остальные зависимые переменные [из уравнений (1), (2) или (3), (4) потенциал $\underline{\varphi}_2$]. Исключению зависимой переменной соответствует основное преобразование графа — исключение промежуточного узла.

Правила исключения промежуточного узла в простейших графах показаны на рис. 4.20, *а—в*, где цифрами обозначены узлы и указаны значения передач ветвей до и после исключения. С применением этих правил исключен узел $\underline{\varphi}_2$ рис. 4.19, *в* и получен граф рис. 4.19, *г*.

На рис. 4.19, *г* и 4.20, *г* после исключения промежуточного узла получилась, в частности, ветвь — петля, входящая в тот же узел, из которого она выходит. На рис. 4.21, *а—в* показаны правила устранения промежуточного узла с петлей. Во втором случае сначала образуется дополнительный узел (*5* на рис. 4.21, *б*), который затем исключается.

Путем применения этих правил получен граф рис. 4.19, *д*. После исключения дополнительного узла (рис. 4.19, *е*) можно сразу записать искомый потенциал:

$$\underline{\varphi}_1=\underline{\varphi}_1'=\frac{\underline{a}_{11}}{1-\underline{a}_{21}\underline{a}_{12}}\underline{E}_1+$$

$$+\frac{\underline{a}_{22}\underline{a}_{12}}{1-\underline{a}_{21}\underline{a}_{12}}\underline{E}_2.$$

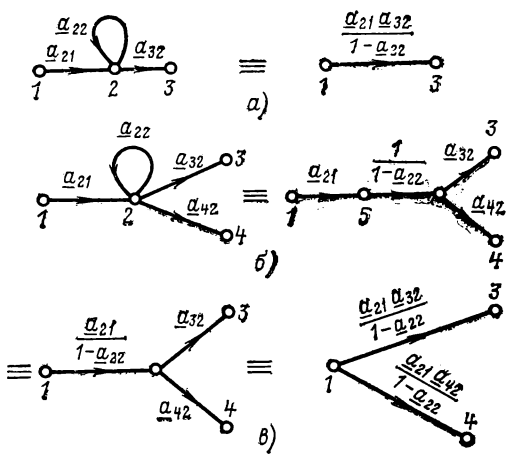


Рис. 4.21

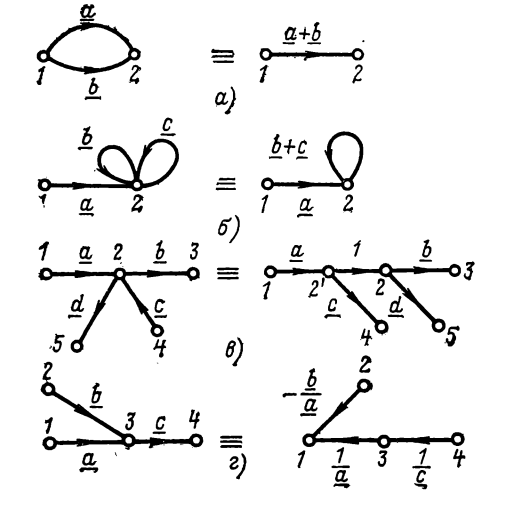


Рис. 4.22

На рис. 4.22, *а—г* показан еще ряд правил преобразования графа.

Для графа с одним истоком и одним стоком передача (передаточная функция) между ними может быть определена по топологической формуле (Мэзона). Применение этой формулы требует введения для графа следующих понятий: 1) путь (направленный) — непрерывная последовательность ветвей графа между какими-либо двумя узлами при условии, что начальный узел каждой ветви (кроме первой) совпадает с конечным узлом предыдущей ветви, причем каждый узел и ветвь в этой последовательности встречаются один раз; 2) прямой путь — путь, начинающийся в истоке и заканчивающийся в стоке; 3) передача прямого пути $\underline{\Pi}_k$ — произведение передач всех ветвей этого пути; 4) контур — замкнутый путь, т. е. начинающийся и заканчивающийся в одном и том же узле; 5) передача контура $\underline{L}_k$ — произведение передач ветвей этого контура (в частном случае контур может состоять из одной ветви-петли); 6) определитель графа $\underline{\Delta}$ — определитель системы уравнений, отображаемых графом; 7) минор прямого пути $\underline{\Delta}_k$ — определитель графа, получающегося после исключения всех ветвей k-го прямого пути и ветвей, имеющих с этим путем общие узлы (определитель той части исходного графа, которая не соприкасается с k-м прямым путем).

$$\text{Передача } H = \frac{\sum_k \underline{\Pi}_k \underline{\Delta}_k}{\underline{\Delta}},$$

где суммирование должно быть выполнено по всем прямым путям:

$$\underline{\Delta} = 1 - \sum_k \underline{P}_k^{(1)} + \sum_k \underline{P}_k^{(2)} - \sum_k \underline{P}_k^{(3)} + \ldots;$$

$\sum_k \underline{P}_k^{(1)} = \sum_k \underline{L}_k$ — сумма передач всех контуров графа; $\sum_k \underline{P}_k^{(i)} = \sum_k \underline{L}_{k1}\underline{L}_{k2} \ldots \underline{L}_{ki}$ — сумма произведений передач всех возможных комбинаций из i некасающихся контуров ($i = 2, 3 \ldots$); миноры $\underline{\Delta}_k$ вычисляются по той же формуле, что и $\underline{\Delta}$.

Если граф имеет несколько истоков (независимых переменных), то для определения зависимой переменной нужно применить метод наложения.

Пример. Для графа рис. 4.19, *в* определить передачу $\underline{H}$ между истоком $\underline{E}_1$ и стоком $\underline{\Phi}_1'$.

Контур один (состоящий из ветвей с передачами $\underline{a}_{12}$ и $\underline{a}_{21}$), т.е. $k=1$. Следовательно,

$$\sum_k \underline{P}_k^{(1)} = \underline{L}_1 = \underline{a}_{21}\underline{a}_{12}; \quad \sum_k \underline{P}_k^{(i)} = 0 \text{ при } i > 1,$$

так как контур один, и $\underline{\Delta} = 1 - \underline{a}_{21}\underline{a}_{12}$. Передача прямого пути $\underline{\Pi}_k = \underline{\Pi}_1 = \underline{a}_{11} \cdot 1$. После исключения прямого пути между узлами $\underline{E}_1$ и $\underline{\Phi}_1'$, т.е. ветвей с передачами $\underline{a}_{11}$ и 1 и ветвей (с передачами $\underline{a}_{21}$ и $\underline{a}_{12}$), имеющих с ним общий узел $\underline{\Phi}_1$, остается граф по рис. 4.19, *ж*, для которого $\sum_k \underline{P}_k^{(1)} = 0$ и $\sum_k \underline{P}_k^{(i)} = 0$, т. е $\underline{\Delta}_k = \underline{\Delta}_1 = 1$. Передача

$$\underline{H}_1 = \underline{\Phi}_1'/\underline{E}_1 = \underline{a}_{11}/\left(1 - \underline{a}_{21}\underline{a}_{12}\right).$$

Аналогично для передачи $\underline{H}_2$ между истоком $\underline{E}_2$ и стоком $\underline{\Phi}_1'$

$$\sum_k \underline{P}_k^{(1)} = \underline{L}_1 = \underline{a}_{21}\underline{a}_{12}; \quad \sum_k \underline{P}_k^{(i)} = 0;$$

$$\underline{\Delta} = 1 - \underline{a}_{21}\underline{a}_{12}; \quad \underline{\Pi}_1 = \underline{a}_{22}\underline{a}_{12} \cdot 1; \quad \underline{\Delta}_1 = 1,$$

т. е.

$$\underline{H}_2 = \underline{\Phi}_1'/\underline{E}_2 = \underline{a}_{22}\underline{a}_{12}/\left(1 - \underline{a}_{21}\underline{a}_{12}\right),$$

что совпадает с ранее полученным результатом.

Литература [4.1—4.25].

4.2. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Трехфазная система с нейтральным проводом

На рис. 4.23 обозначено: $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ — фазные напряжения генератора, которые, если

можно пренебречь внутренними сопротивлениями генератора, равны фазным ЭДС $\underline{E}_A$, $\underline{E}_B$, $\underline{E}_C$; $\underline{U}_a$, $\underline{U}_b$, $\underline{U}_c$ — фазные напряжения приемника; $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$; $\underline{U}_{CA}$ — линейные напряжения генератора: $\underline{U}_{AB}=\underline{U}_A-\underline{U}_B$, $\underline{U}_{BC}=\underline{U}_B-\underline{U}_C$, $\underline{U}_{CA}=\underline{U}_C-\underline{U}_A$; $\underline{U}_{ab}$, $\underline{U}_{bc}$, $\underline{U}_{ca}$ — линейные напряжения приемника; $\underline{Z}_л$ — эквивалентное сопротивление одного провода линии; $\underline{Z}_N$ — эквивалентное сопротивление нейтрального провода; $\underline{Z}_a$, $\underline{Z}_b$, $\underline{Z}_c$ — фазные сопротивления приемника.

Напряжение между нейтральными точками генератора и приемника (смещение нейтрали), если принять $\varphi_N=0$,

$$\underline{U}_N=\underline{\varphi}_n-\underline{\varphi}_N=\underline{\varphi}_n=\frac{\underline{U}_A\underline{Y}_A+\underline{U}_B\underline{Y}_B+\underline{U}_C\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A+\underline{Y}_B+\underline{Y}_C+\underline{Y}_N},$$

где

$$\underline{Y}_A=1/(\underline{Z}_л+\underline{Z}_a);\quad \underline{Y}_B=1/(\underline{Z}_л+\underline{Z}_b);$$
$$\underline{Y}_C=1/(\underline{Z}_л+\underline{Z}_c);\quad \underline{Y}_N=1/\underline{Z}_N.$$

Линейные токи:

$$\underline{I}_A=(\underline{U}_A-\underline{U}_N)\underline{Y}_A;\quad \underline{I}_B=(\underline{U}_B-\underline{U}_N)\underline{Y}_B;$$
$$\underline{I}_C=(\underline{U}_C-\underline{U}_N)\underline{Y}_C.$$

Ток в нейтральном проводе $\underline{I}_N=\underline{I}_A+\underline{I}_B+\underline{I}_C$. Фазные и линейные напряжения: приемника

$$\underline{U}_a=\underline{\varphi}_a-\underline{\varphi}_n=\underline{Z}_a\underline{I}_A;\quad \underline{U}_{ab}=\underline{U}_a-\underline{U}_b;$$
$$\underline{U}_b=\underline{\varphi}_b-\underline{\varphi}_n=\underline{Z}_b\underline{I}_B;\quad \underline{U}_{bc}=\underline{U}_b-\underline{U}_c;$$
$$\underline{U}_c=\underline{\varphi}_c-\underline{\varphi}_n=\underline{Z}_c\underline{I}_C;\quad \underline{U}_{ca}=\underline{U}_c-\underline{U}_a.$$

При расчете цепей по этим формулам необходимо помнить, что трехфазная система с вращающимися электрическими машинами не всегда может быть представлена схемой по рис. 4.23, так как сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей (см. ниже) могут иметь различные значения.

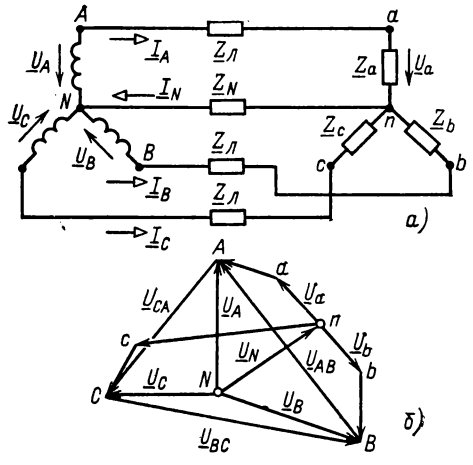


Рис. 4.23

Трехфазная система без нейтрального провода

Пусть обмотки генератора соединены в звезду. Трехфазный приемник может быть соединен в треугольник или звезду.

Соединение звезда—звезда. Во все предыдущие формулы подставляется $\underline{Y}_N=0$.

Если же заданы линейные напряжения, то

$$\underline{U}_{An}=\frac{\underline{U}_{AB}\underline{Y}_B-\underline{U}_{CA}\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A+\underline{Y}_B+\underline{Y}_C};$$

$$\underline{U}_{Bn}=\frac{\underline{U}_{BC}\underline{Y}_C-\underline{U}_{AB}\underline{Y}_A}{\underline{Y}_A+\underline{Y}_B+\underline{Y}_C};$$

$$\underline{U}_{Cn}=\frac{\underline{U}_{CA}\underline{Y}_A-\underline{U}_{BC}\underline{Y}_B}{\underline{Y}_A+\underline{Y}_B+\underline{Y}_C};\quad \underline{I}_A=\underline{Y}_A\underline{U}_{An};$$
$$\underline{I}_B=\underline{Y}_B\underline{U}_{Bn};\quad \underline{I}_C=\underline{Y}_C\underline{U}_{Cn}.$$

Соединение звезда — треугольник (рис. 4.24, *а*). Трехфазный приемник, соединенный в треугольник, преобразуем в звезду по формулам § 4.1. Рассчитываются токи $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$ и линейные напряжения приемника, как указано выше. Фазные токи:

$$\underline{I}_{ab}=\underline{U}_{ab}/\underline{Z}_{ab};\quad \underline{I}_{bc}=\underline{U}_{bc}/\underline{Z}_{bc};\quad \underline{I}_{ca}=\underline{U}_{ca}/\underline{Z}_{ca}.$$

Обмотка генератора соединена треугольником.

Соединение треугольник — треугольник. Если симметричный генератор соединен треугольником, то в общем случае для расчета внешней цепи данный генератор можно заменить симметричным генератором, соединенным звездой, с $U_A=U_B=U_C=U_{AB}/\sqrt{3}$ и далее проводить расчет, как указано выше.

Если можно считать $\underline{Z}_л=0$ (рис. 4.24, *б*), то проще сначала найти

$$\underline{I}_{ab}=\underline{U}_{AB}/\underline{Z}_{ab};\quad \underline{I}_{bc}=\underline{U}_{BC}/\underline{Z}_{bc};\quad \underline{I}_{ca}=\underline{U}_{CA}/\underline{Z}_{ca};$$

а затем

$$\underline{I}_A=\underline{I}_{ab}-\underline{I}_{ca};\quad \underline{I}_B=\underline{I}_{bc}-\underline{I}_{ab};\quad \underline{I}_C=\underline{I}_{ca}-\underline{I}_{bc}.$$

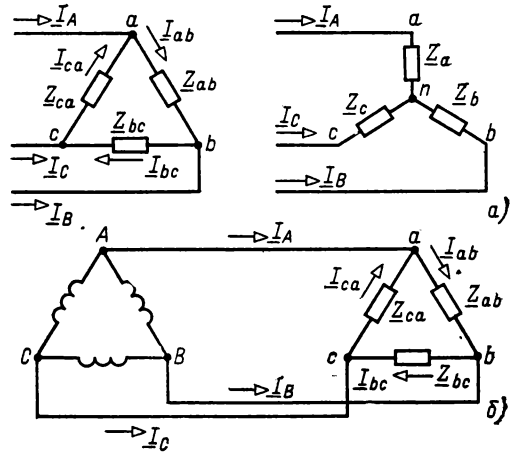


Рис. 4.24

Симметричная трехфазная система

Фазные напряжения симметричного генератора, соединенного звездой (рис. 4.25):

$$u_A = U_m \sin \omega t; \quad u_B = U_m \sin(\omega t - 120°);$$
$$u_C = U_m \sin(\omega t + 120°),$$

или

$$\underline{U}_A = U_\Phi; \quad \underline{U}_B = U_\Phi \angle -120°;$$
$$\underline{U}_C = U_\Phi \angle +120°.$$

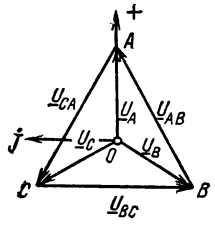


Рис. 4.25

Линейные напряжения

$$U_л = \sqrt{3}\, U_\Phi \text{ и } \underline{U}_{AB} = U_л \angle +30°;$$
$$\underline{U}_{BC} = U_л \angle -90°; \quad \underline{U}_{CA} = U_л \angle +150°.$$

При симметричном приемнике, соединенном звездой, $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}$; смещение нейтрали $U_N = 0$.

Линейные токи

$$I_A = I_B = I_C = U_\Phi / |\underline{Z}_л + \underline{Z}| = I_л$$

и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120°, ток $I_N = 0$ и при наличии нейтрального провода. Фазные и линейные напряжения приемника соответственно одинаковы по значению:

$$U_a = U_b = U_c; \quad U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = \sqrt{3}\, U_a.$$

При симметричном приемнике, соединенном треугольником, $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}$ и линейные токи одинаковы по значению

$$I_A = I_B = I_C = U_\Phi / |\underline{Z}_л + \underline{Z}/3| = I_л$$

и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120°.

Аналогично фазные токи приемника

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_л / \sqrt{3}$$

и фазные напряжения приемника

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = |\underline{Z}|\, I_л / \sqrt{3}.$$

Для обоих случаев активная мощность генератора

$$P_г = 3U_A I_A \cos \varphi_г = \sqrt{3}\, U_л I_л \cos \varphi_г,$$

реактивная мощность генератора

$$Q_г = 3U_A I_A \sin \varphi_г = \sqrt{3}\, U_л I_л \sin \varphi_г,$$

где $\varphi_г$ — угол сдвига фаз между фазным напряжением генератора и током в той же фазе генератора, который равен току в линии при соединении обмоток генератора звездой;

активная мощность приемника

$$P_п = 3U_a I_A \cos \varphi_п = \sqrt{3}\, U_{ab} I_л \cos \varphi_п;$$

реактивная мощность приемника

$$Q_п = 3U_a I_A \sin \varphi_п = \sqrt{3}\, U_{ab} I_л \sin \varphi_п,$$

где $\varphi_п$ — угол сдвига фаз между фазным напряжением приемника и током в той же фазе приемника, который равен $I_л$ только при соединении звездой;

полная мощность генератора

$$S_г = 3U_A I_A = \sqrt{3}\, U_л I_л,$$

полная мощность приемника

$$S_п = 3U_a I_A = \sqrt{3}\, U_{ab} I_л.$$

Метод симметричных составляющих

Метод симметричных составляющих состоит в приведении несимметричных трехфазных систем к симметричным. Метод основан на разложении каждого из трех заданных (или искомых) векторов (например, $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$) на сумму трех векторов: нулевой ($\underline{U}_0$), прямой ($\underline{U}_1$) и обратной ($\underline{U}_2$) последовательностей (рис. 4.26):

$$\underline{U}_A = \underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2; \quad \underline{U}_B = \underline{U}_0 + \underline{U}_1 a^2 + \underline{U}_2 a;$$
$$\underline{U}_C = \underline{U}_0 + \underline{U}_1 a + \underline{U}_2 a^2,$$

откуда

$$\underline{U}_0 = (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)/3;$$
$$\underline{U}_1 = (\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C)/3;$$
$$\underline{U}_2 = (\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C)/3,$$

где $a = 1e^{j\,120°} = 1\angle +120°$ — фазовый множитель; $a^2 = 1e^{-j120°} = 1\angle -120°$.

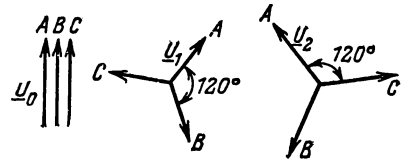


Рис. 4.26

Составляющие нулевой, прямой и обратной последовательностей могут быть найдены геометрическим построением в соответствии с приведенными аналитическими выражениями. После разложения несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие применяют метод наложения, т. е. рассчитывают цепь отдельно для нулевой, прямой и обратной последовательностей. При этом сопротивления для нулевой, прямой и обратной последовательностей могут быть различными. Данный метод позволяет суммировать не только токи и напряжения, но и активные мощности

$$P = 3U_0 I_0 \cos \varphi_0 + 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 + 3U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

и реактивные мощности:

$$Q = 3U_0 I_0 \sin \varphi_0 + 3U_1 I_1 \sin \varphi_1 + 3U_2 I_2 \sin \varphi_2.$$

Метод симметричных составляющих может быть применен и для двухфазных систем.

Литература [4.1—4.6, 4.26, 4.27].

4.3. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ

Разложение периодических функций в тригонометрический ряд

Несинусоидальные периодические ЭДС, напряжения, токи и т. д. (рис. 4.27) раскладываются в тригонометрический ряд (Эйлера—Фурье), который может быть записан в любой из трех форм:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin(k\omega_1 t + \psi_k);$$

$$f(t) = d_0 + \sum_{k=1}^{\infty} d_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k);$$

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\omega_1 t + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin k\omega_1 t,$$

где $\omega_1 = 2\pi/T$ — частота (угловая) основной или первой гармоники; $k\omega_1$ — частоты высших гармоник; c_k, d_k, a_k, b_k — амплитуды гармоник; $c_0 = d_0 = a_0$ — постоянные составляющие, причем

$$a_k = d_k \cos\varphi_k = c_k \sin\psi_k;$$

$$b_k = -d_k \sin\varphi_k = c_k \cos\psi_k;$$

$$d_k = c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2};$$

$$\operatorname{tg}\varphi_k = -b_k/a_k; \quad \operatorname{tg}\psi_k = a_k/b_k;$$

$$\psi_k = \varphi_k + \pi/2.$$

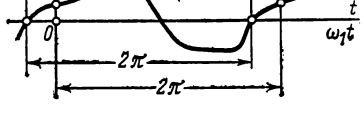


Рис. 4.27

Коэффициенты ряда определяются по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\,dt = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\,d\omega_1 t;$$

$$a_k = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos k\omega_1 t\,dt = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\cos k\omega_1 t\,d\omega_1 t;$$

$$b_k = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin k\omega_1 t\,dt = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\sin k\omega_1 t\,d\omega_1 t.$$

Для четной функции $f(t) = f(-t)$ (симметрия относительно оси ординат)

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} f(t)\,dt = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} f(t)\,d\omega_1 t;$$

$$a_k = \frac{4}{T}\int_0^{T/2} f(t)\cos k\omega_1 t\,dt = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} f(t)\cos k\omega_1 t\,d\omega_1 t;$$

$$b_k = 0.$$

Для нечетной функции $f(t) = -f(-t)$ (симметрия относительно начала координат)

$$a_0 = 0; \quad a_k = 0; \quad b_k = \frac{4}{T}\int_0^{T/2} f(t)\sin k\omega_1 t\,dt = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} f(t)\sin k\omega_1 t\,d\omega_1 t.$$

Если необходимо, начало отсчета времени ($t=0$) можно переносить так, чтобы функция стала четной или нечетной.

Для функции $f(t) = -f(t+T/2)$ ряд содержит только нечетные гармоники: $a_0 = a_{2k} = b_{2k} = c_{2k} = d_{2k} = 0$.

Если еще $f(t) = f(T/2-t)$, то $a_k = 0$.

В табл. 4.3 приведены разложения наиболее часто встречающихся периодических функций.

В комплексной форме ряд $f(t) = \sum_{k=-\infty} \underline{D}_k \times e^{jk\omega_1 t}$, где

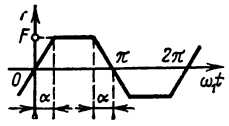
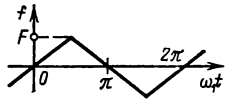
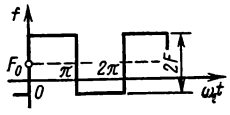
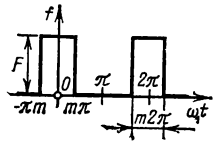
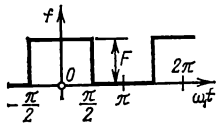
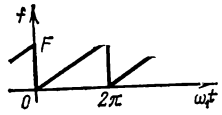
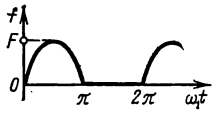
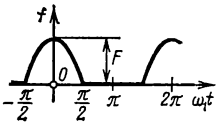
$$\underline{D}_k = D_k e^{j\varphi_k} = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\,e^{-jk\omega_1 t}\,dt = \frac{1}{2}(a_k - jb_k); \quad D_k = \frac{1}{2}\sqrt{a_k^2 + b_k^2} = d_k/2; \quad \underline{D}_{-k} = \frac{1}{2}(a_k + jb_k) = \underline{D}_k^*;$$

$$D_0 = a_0 = d_0.$$

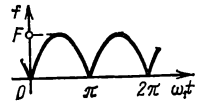
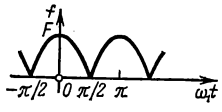
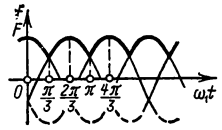
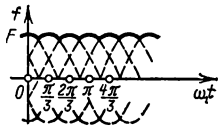
Совокупность амплитуд гармоник (c_0 и c_k, d_0 и d_k, D_0 и D_k) составляет дискретный (линейчатый) спектр амплитуд, а совокупность начальных фаз (ψ_k или φ_k) — спектр фаз.

Ряд Эйлера — Фурье дает спектральный состав периодической несинусоидальной функции (напряжения, тока и т. д.).

Таблица 4.3. Разложение периодических функций в тригонометрический ряд

№ п. п.	График $f(t)$	Разложение в ряд $f(t)$
1		$f(t)=\frac{4F}{\pi\alpha}\left(\sin\alpha\sin\omega_1 t+\frac{1}{9}\sin 3\alpha\sin 3\omega_1 t+\frac{1}{25}\sin 5\alpha\sin 5\omega_1 t+\ldots\right)$
2		$f(t)=\frac{8F}{\pi^2}\left(\sin\omega_1 t-\frac{1}{9}\sin 3\omega_1 t+\frac{1}{25}\sin 5\omega_1 t-\ldots\right)$
3		$f(t)=F_0+\frac{4F}{\pi}\left(\sin\omega_1 t+\frac{1}{3}\sin 3\omega_1 t+\frac{1}{5}\sin 5\omega_1 t+\ldots\right)$
4		$f(t)=mF+\frac{2F}{\pi}\left(\sin m\pi\cos\omega_1 t+\frac{1}{2}\sin 2m\pi\cos 2\omega_1 t+\frac{1}{3}\sin 3m\pi\cos 3\omega_1 t+\ldots\right)$
5		$f(t)=\frac{F}{2}+\frac{2F}{\pi}\left(\cos\omega_1 t-\frac{1}{3}\cos 3\omega_1 t+\frac{1}{5}\cos 5\omega_1 t-\ldots\right)$
6		$f(t)=\frac{F}{2}-\frac{F}{\pi}\left(\sin\omega_1 t+\frac{1}{2}\sin 2\omega_1 t+\frac{1}{3}\sin 3\omega_1 t+\ldots\right)$
7		$f(t)=\frac{2F}{\pi}\left(\frac{1}{2}+\frac{\pi}{4}\sin\omega_1 t-\frac{1}{1\cdot 3}\cos 2\omega_1 t-\frac{1}{3\cdot 5}\cos 4\omega_1 t-\ldots\right)$
8		$f(t)=\frac{2F}{\pi}\left(\frac{1}{2}+\frac{\pi}{4}\cos\omega_1 t+\frac{1}{1\cdot 3}\cos 2\omega_1 t-\frac{1}{3\cdot 5}\cos 4\omega_1 t+\frac{1}{5\cdot 7}\cos 6\omega_1 t-\ldots\right)$

Продолжение табл. 4.3

№ п. п.	График $f(t)$	Разложение в ряд $f(t)$
9		$f(t)=\frac{4F}{\pi}\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{1\cdot3}\cos 2\omega_1 t-\frac{1}{3\cdot5}\cos 4\omega_1 t-\ldots\right)$
10		$f(t)=\frac{4F}{\pi}\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{1\cdot3}\cos 2\omega_1 t-\frac{1}{3\cdot5}\cos 4\omega_1 t+\frac{1}{5\cdot7}\cos 6\omega_1 t-\ldots\right)$
11		$f(t)=\frac{3\sqrt{3}F}{\pi}\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{2\cdot4}\cos 3\omega_1 t-\frac{1}{5\cdot7}\cos 6\omega_1 t+\frac{1}{8\cdot10}\cos 9\omega_1 t-\ldots\right)$
12		$f(t)=\frac{6F}{\pi}\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{5\cdot7}\cos 6\omega_1 t-\frac{1}{11\cdot13}\cos 12\omega_1 t+\frac{1}{17\cdot19}\cos 18\omega_1 t-\ldots\right)$

Действующие и средние значения несинусоидальных периодических величин

Действующее значение F несинусоидальной периодической величины $f(t)$ (напряжения, тока, ЭДС и т. д.)

$$F=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T f^2(t)\,dt}=$$

$$=\sqrt{F_0^2+F_1^2+F_2^2+F_3^2+\ldots},$$

где F_0 — постоянная составляющая; F_1 — действующее значение первой гармоники; F_2, F_3 ... — действующие значения высших гармоник, причем $F_k=F_{km}/\sqrt{2}$ ($k=1, 2, 3...$) и F_{km} — амплитуда гармоники.

Среднее значение за период равно постоянной составляющей $F_0=a_0=c_0=d_0$.

Среднее по модулю значение, измеряемое прибором выпрямительной системы,

$$F_{ср}=\frac{1}{T}\int_0^T |f(t)|\,dt.$$

Среднее максимальное за половину периода

$$F_{ср\,max}=\frac{2}{T}\int_{t_1}^{t_1+T/2} f(t)\,dt.$$

Так как среднее значение зависит от выбранного t_1, то t_1 должно выбираться так, чтобы интеграл был максимальным.

Коэффициенты несинусоидальности

Степень несинусоидальности оценивается коэффициентами амплитуды k_a, формы $k_ф$, искажений $k_{иск}$ и гармоник $k_г$:

$$k_a=f_{max}/F;\quad k_ф=F/F_{ср};$$

$$k_{иск}=F_1/F;\quad k_г=F_s/F_1,$$

где f_{max} — максимальное (пиковое) значение; $F_s=\sqrt{F^2-F_0^2-F_1^2}$. Для синусоидальных величин $k_a=\sqrt{2}$; $k_ф=1{,}11$; $k_{иск}=1$; $k_г=0$.

Мощность

Активная мощность

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T ui\,dt=U_0I_0+\sum_{k=1}^{\infty}U_kI_k\cos\varphi_k,$$

где φ_k — сдвиг по фазе между напряжением и током k-й гармоники.

Полная мощность

$$S=UI=\sqrt{U_0^2+U_1^2+U_2^2+\ldots}\times$$

$$\times\sqrt{I_0^2+I_1^2+I_2^2+\ldots}.$$

Реактивная мощность

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k \neq \sqrt{S^2 - P^2}.$$

Коэффициент мощности

$$\lambda = P/S.$$

Если напряжение синусоидальное, т. е. $u = U_{1m} \sin \omega_1 t$, как, например, напряжение достаточно мощной сети в выпрямительных установках, то

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = S_1 \cos \varphi_1; \quad S = U_1 I;$$
$$\lambda = (S_1/S) \cos \varphi_1 = k_{\text{иск}} \cos \varphi_1.$$

Эквивалентные синусоиды

При несинусоидальных напряжениях и токах, если несинусоидальность не имеет принципиального значения, их можно заменить эквивалентными синусоидальными напряжением и током. При замене действующее значение синусоидальной величины должно быть равно действующему значению несинусоидальной величины. Угол сдвига фаз θ между эквивалентными напряжением и током выбирается так, чтобы активная мощность осталась прежней:

$$P = UI \cos \theta = S \cos \theta.$$

Эквивалентная реактивная мощность

$$Q_{\text{эк}} = UI \sin \theta = \sqrt{S^2 - P^2} \neq Q.$$

Высшие гармоники в трехфазных цепях

Фазные напряжения могут кроме основной гармоники содержать еще нечетные высшие:

$$u_A = U_{1m} \sin \omega_1 t + U_{3m} \sin (3\omega_1 t + \psi_3) + U_{5m} \sin (5\omega_1 t + \psi_5) + U_{7m} \sin (7\omega_1 t + \psi_7) + \ldots;$$
$$u_B = U_{1m} \sin (\omega_1 t - 120^\circ) + U_{3m} \sin (3\omega_1 t + \psi_3) + U_{5m} \sin (5\omega_1 t + 120^\circ + \psi_5) + \ldots;$$
$$u_C = U_{1m} \sin (\omega_1 t + 120^\circ) + U_{3m} \sin (3\omega_1 t + \psi_3) + U_{5m} \sin (5\omega_1 t - 120^\circ + \psi_5) + \ldots$$

Все высшие гармоники, кратные трем (3-я, 9-я и т. д.), имеют во всех фазах симметричной трехфазной системы в любой момент тождественные значения как составляющие нулевой последовательности. Первая (7-я, 13-я, 19-я и т. д.) гармоника во всех фазах сдвинута так же, как составляющие прямой последовательности. Пятая (11-я, 17-я и т. д.) гармоника имеет обратную последовательность.

Действующее значение фазного напряжения генератора, соединенного звездой,

$$U_{\text{ф}} = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + \ldots}.$$

Линейное напряжение

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}\sqrt{U_1^2 + U_5^2 + U_7^2 + U_{11}^2 + \ldots} < \sqrt{3} U_{\text{ф}}.$$

При симметричной нагрузке в системе без нейтрального провода в линейных токах отсутствуют гармоники, кратные трем. При симметричной нагрузке в системе с нейтральным проводом линейные токи содержат все нечетные гармоники, а ток в нейтральном проводе

$$I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \ldots}.$$

При соединении обмоток генератора треугольником для гармоник, кратных трем, образуется короткозамкнутый контур и в линейных напряжениях, как и при соединении звездой, гармоники, кратные трем, отсутствуют.

Литература [4.1—4.7, 4.28—4.31].

4.4. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Переходные процессы в линейных цепях с сосредоточенными параметрами

Законы Кирхгофа, записанные для мгновенных значений ЭДС, напряжений и токов, справедливы и для переходных режимов (дифференциальные уравнения).

Классический метод

При решении задачи классическим методом составляют необходимое число дифференциальных уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для схемы, получающейся после коммутации. Из полученной системы уравнений исключают все неизвестные токи, кроме искомого тока (или искомого напряжения). В результате получается уравнение вида

$$a_n \frac{d^n i}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} i}{dt^{n-1}} + \ldots + a_1 \frac{di}{dt} + a_0 i = F(t),$$

где a_k — постоянные коэффициенты; $F(t)$ — известная функция времени.

Решением этого неоднородного дифференциального уравнения является функция $i = i(t)$, состоящая из двух частей: частного решения неоднородного уравнения и общего решения соответствующего однородного уравнения (в правой части нуль).

Если в цепи действуют источники гармонических или постоянных ЭДС или токов, то в качестве частного решения можно взять решение для установившегося режима (принужденного режима) в той же цепи после коммутации $i_{\text{у}} = i_{\text{у}}(t)$.

Установившийся режим рассчитывается методами, изложенными в § 4.1.

Общее решение однородного уравнения — свободный ток $i_{\text{св}} = i_{\text{св}}(t)$ имеет вид:

$$i_{\text{св}} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \ldots + A_n e^{p_n t},$$

где A_1, A_2, ..., A_n — постоянные интегрирования; p_1, p_2, ..., p_n — корни характеристического уравнения:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_1 p + a_0 = 0.$$

Если среди корней есть кратные, например $p_1=p_2$, то

$$i_{св}=(A_1+A_2 t)\,e^{p_1 t}+A_3 e^{p_3 t}+\ldots+A_n e^{p_n t}.$$

Если среди корней есть пара комплексных сопряженных, например $p_{1,2}=-\delta\pm j\omega$, то в общем решении удобнее соответствующую пару экспонент заменить функцией

$$Ae^{-\delta t}\sin(\omega t+\alpha),$$

где A и α — постоянные интегрирования, заменившие постоянные A_1 и A_2.

Искомая функция, т. е. действительный ток переходного процесса,

$$i=i_y+i_{св}=i_y+A_1 e^{p_1 t}+$$
$$+A_2 e^{p_2 t}+\ldots+A_n e^{p_n t}.$$

Постоянные A_1, A_2, ..., A_n определяются из начальных условий и законов коммутации: 1) ток в индуктивном элементе i_L не может изменяться скачком; 2) напряжение на емкостном элементе u_C не может изменяться скачком.

Из расчета цепи до коммутации могут быть найдены токи в катушках индуктивности и напряжения на конденсаторах в любой момент времени. В частности, в момент коммутации, который считается моментом $t=0$, находим $i_L(0)$ и $u_C(0)$.

Примечание. В «некорректных» задачах могут быть заданы такие коммутации, что в некоторых индуктивных элементах токи принудительно изменяются скачком, а на некоторых емкостных элементах напряжения принудительно изменяются скачком. В этом случае законы коммутации должны применяться в более общей форме, требующей отсутствия скачкообразных изменений потокосцеплений и электрических зарядов.

Подставляя найденные значения $i_L(0)$ и $u_C(0)$ в уравнения Кирхгофа, находим из них:

$$i(0);\quad di/dt\,|_{t=0};\quad \ldots\quad ;\quad d^{n-1}i/dt^{n-1}\,|_{t=0}.$$

Коэффициенты A_1, A_2, ..., A_n определяются из системы уравнений:

$$i(0)=i_y(0)+A_1+A_2+\ldots+A_n;$$
$$\left.\frac{di}{dt}\right|_{t=0}=\left.\frac{di_y}{dt}\right|_{t=0}+A_1 p_1+A_2 p_2+$$
$$+\ldots+A_n p_n;$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$\left.\frac{d^{n-1}i}{dt^{n-1}}\right|_{t=0}=\left.\frac{d^{n-1}i_y}{dt^{n-1}}\right|_{t=0}+$$
$$+A_1 p_1^{n-1}+A_2 p_2^{n-1}+\ldots+A_n p_n^{n-1},$$

где корни характеристического уравнения p_1, p_2, ..., p_n и начальные значения тока и его $n-1$ производных $i(0)$, $di/dt|_{t=0}$... уже известны, а начальные значения принужденного тока и его производных легко определить, так как установившийся режим после коммутации уже рассчитан.

Результаты расчета для простейших цепей приведены в табл. 4.4.

Пример (рис. 4.28, *а*). В момент $t=0$ рубильник мгновенно переключается из положения *1* в положение *2*. Дано: $E=10$ В; $r=10$ Ом; $C=100$ мкФ; $L=62{,}5$ мГн; $\omega L=20$ Ом; $E_m=10$ В; $\psi=30°$. Найти ток i. Угол $\psi=30°$ характеризует значение ЭДС в момент коммутации $e(0)=E_m\sin\psi=5$ В.

Уравнения Кирхгофа для схемы после коммутации:

$$-i+i_1+i_2=0; \qquad (1)$$
$$ri+L\,di_1/dt=E; \qquad (2)$$
$$ri+u_C=ri+\frac{1}{C}\int_0^t i_2\,dt+u_C(0)=E, \qquad (3)$$

или после дифференцирования (3)

$$r\,di/dt+i_2/C=0. \qquad (4)$$

Из системы уравнений (1), (2), (4) дифференцированием (1) и (4) и подстановкой di_1/dt и di_2/dt из (2) и (4) в (1) исключаем токи i_1 и i_2 и получаем уравнение:

$$\frac{d^2 i}{dt^2}+\frac{1}{rC}\frac{di}{dt}+\frac{1}{LC}i=\frac{1}{LC}\frac{E}{r}.$$

Частное решение этого уравнения, т. е. установившийся ток в схеме после коммутации, $i_y=E/r=1$ А.

Характеристическое уравнение

$$p^2+p/rC+1/LC=0$$

имеет решение:

$$p_{1,2}=-1/2rC\pm\sqrt{1/4r^2C^2-1/LC};$$

$$p_1=-200\ \text{с}^{-1};\quad p_2=-800\ \text{с}^{-1}.$$

Общее решение однородного уравнения, или свободный ток, имеет два слагаемых:

$$i_{св}=A_1 e^{-200t}+A_2 e^{-800t}.$$

Ток i переходного процесса

$$i=i_y+i_{св}=1+A_1 e^{-200t}+A_2 e^{-800t}. \qquad (5)$$

Для определения постоянных интегрирования составляем систему уравнений. Полагая в (5) $t=0$, получаем

$$i(0)=1+A_1+A_2. \qquad (6)$$

Дифференцируя (5) и полагая $t=0$, получаем:

$$di/dt\,|_{t=0}=-200A_1-800A_2. \qquad (7)$$

При помощи законов коммутации находим $i(0)$ и $di/dt|_{t=0}$. Для этого сначала определяем i_1 и u_C в схеме до коммутации:

$$i_1=\frac{E_m}{\omega L}\sin(\omega t+\psi-90°);$$
$$u_C=E_m\sin(\omega t+\psi).$$

Отсюда при $t=0$ (в момент коммутации)

$$i_1(0)=\frac{E_m}{\omega L}\sin(\psi-90°)=-0{,}44\ A;$$
$$u_C(0)=E_m\sin\psi=5\ \text{В}.$$

Подставляем найденные значения $i_1(0)$ и $u_C(0)$ в уравнения Кирхгофа для схемы после коммутации (1)—(3) для момента $t=0$:

$$-i(0)+i_1(0)+i_2(0)=0,$$

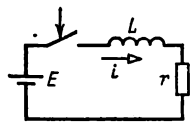
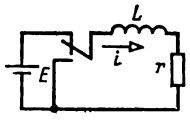
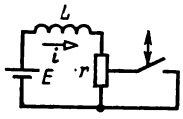
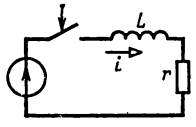
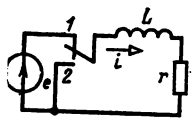
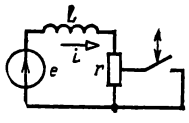
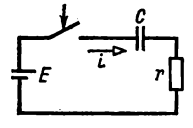
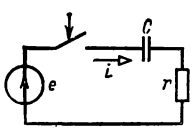
или

$$i(0)=-0{,}44+i_2(0); \qquad (1')$$
$$ri(0)+L\,di_1/dt|_{t=0}=E; \qquad (2')$$
$$ri(0)+u_C(0)=E \text{ или } 10i(0)+5=10. \qquad (3')$$

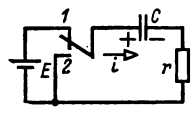
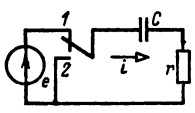
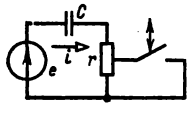
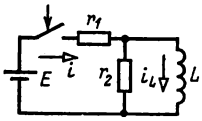
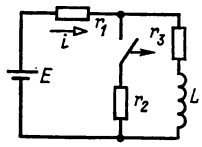
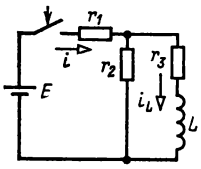
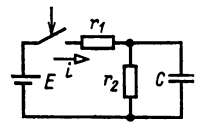
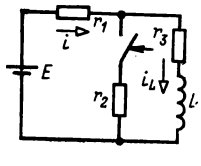
Из (3′) находим $i(0)=0{,}5$ А, а из (1′) находим $i_2(0)=0{,}94$ А; производную $di/dt|_{t=0}$ определяем из (4), полученного дифференцированием (3), подставляя $t=0$:

$$di/dt\,|_{t=0}=-i_2(0)/rC=-940\ \text{А/с}.$$

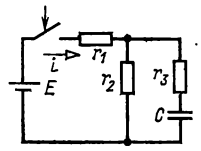
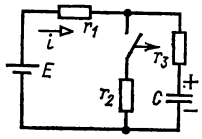
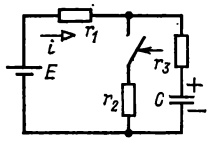
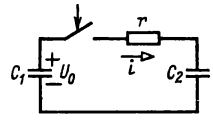
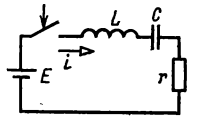
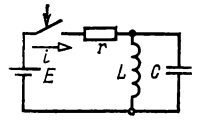
Таблица 4.4. **Переходные процессы в простейших цепях**

Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
	$i = \frac{E}{r}(1 - e^{pt})$; $u_L = Ee^{pt}$	$p = -\frac{r}{L}$
	$i = \frac{E}{r} e^{pt}$; $u_L = -Ec^{pt}$	$p = -\frac{r}{L}$
	$i = \frac{E}{r_2} + E\frac{r_2 - r_1}{r_2 r_1} e^{pt}$; $u_L = E\frac{r_1 - r_2}{r_1} e^{pt}$	$p = -\frac{r_2}{L}$
	$i = \frac{E_m}{z}\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{E_m}{z}\sin(\psi - \varphi)\, e^{pt}$; $u_L = \omega L \frac{E_m}{z}\cos(\omega t + \psi - \varphi) + r\frac{E_m}{z}\sin(\psi - \varphi)\, e^{pt}$	$p = -\frac{r}{L}$
	$i = \frac{E_m}{z}\sin(\psi - \varphi)\, e^{pt}$; $u_L = -r\frac{E_m}{z}\sin(\psi - \varphi)\, e^{pt}$	$p = -\frac{r}{L}$
	$i = \frac{E_m}{z_2}\sin(\omega t + \psi - \varphi_2) + E_m\left[\frac{\sin(\psi - \varphi_1)}{z_1} - \frac{\sin(\psi - \varphi_2)}{z_2}\right] e^{pt}$; $u_L = \omega L \frac{E_m}{z_2}\cos(\omega t + \psi - \varphi_2) - r_2 E_m\left[\frac{\sin(\psi - \varphi_1)}{z_1} - \frac{\sin(\psi - \varphi_2)}{z_2}\right] e^{pt}$	$p = -\frac{r_2}{L}$
	$i = \frac{E}{r} e^{pt}$; $u_C = E(1 - e^{pt})$	$p = -\frac{1}{rC}$
	$i = \frac{E_m}{z}\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{E_m}{z}\frac{1}{r\omega C}\cos(\psi - \varphi)e^{pt}$; $u_C = -\frac{E_m}{z}\frac{1}{\omega C}\cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{E_m}{z}\frac{1}{\omega C}\cos(\psi - \varphi)\, e^{pt}$	$p = -\frac{1}{rC}$

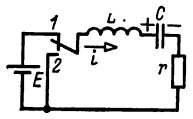
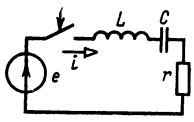
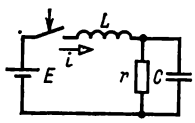
Продолжение табл. 4.4

Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
	$i = -\frac{E}{r} e^{pt}; \quad u_C = Ee^{pt}$	$p = -\frac{1}{rC}$
	$i = \frac{E_m}{z} \frac{1}{r\omega C} \cos(\psi - \varphi) e^{pt};$ $u_C = -\frac{E_m}{z} \frac{1}{\omega C} \cos(\psi - \varphi) e^{pt}$	$p = -\frac{1}{rC}$
	$i = \frac{E_m}{z_2} \sin(\omega t + \psi - \varphi_2) -$ $-\frac{E_m}{z_2 \omega C}\left[\frac{\cos(\psi - \varphi_2)}{z_2} - \frac{\cos(\psi - \varphi_1)}{z_1}\right] e^{pt};$ $u_C = -\frac{E_m}{z_2} \frac{1}{\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi_2) +$ $+\frac{E_m}{\omega C}\left[\frac{\cos(\psi - \varphi_2)}{z_2} - \frac{\cos(\psi - \varphi_1)}{z_1}\right] e^{pt}$	$p = -\frac{1}{r_2 C}$
	$i = \frac{E}{r_1}\left(1 - \frac{r_2}{r_1 + r_2} e^{pt}\right); \quad i_L = \frac{E}{r_1}(1 - e^{pt})$	$p = -\frac{r}{L};$ $r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
	$i = \frac{E}{r_1 + r_3} + \left(\frac{E}{r_1 + R}\frac{R}{r_3} - \frac{E}{r_1 + r_3}\right) e^{pt};$ $u_L = (r_1 + r_3)\left(\frac{E}{r_1 + r_3} - \frac{E}{r_1 + R}\frac{R}{r_3}\right) e^{pt};$ $R = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}$	$p = -\frac{r_1 + r_3}{L}$
	$i = \frac{E}{r_1 + R}\left(1 - \frac{r_2 - R}{r_1 + r_2} e^{pt}\right);$ $i_L = \frac{E}{r_1 + R}\frac{R}{r_3}(1 - e^{pt}); \quad R = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}$	$p = -\frac{r}{L};$ $r = r_3 + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
	$i = \frac{E}{r_1 + r_2}\left(1 + \frac{r_2}{r_1}\right) e^{pt}; \quad u_C = E\frac{r_2}{r_1 + r_2}(1 - e^{pt})$	$p = -\frac{1}{rC};$ $r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
	$i = \frac{E}{r_1 + R} + \left[\frac{E(r_1 + r_2 + r_3)}{(r_1 + r_2)(r_1 + r_3)} - \frac{E}{r_1 + R}\right] e^{pt};$ $i_L = \frac{E}{r_1 + R}\frac{R}{r_3} + \left(\frac{E}{r_1 + r_3} - \frac{E}{r_1 + R}\frac{R}{r_3}\right) e^{pt};$ $R = r_2 r_3/(r_2 + r_3)$	$p = -\frac{r}{L};$ $r = r_3 + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$

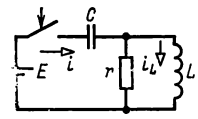
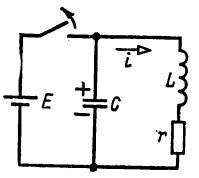
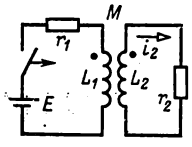
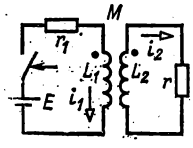
Продолжение табл. 4.4

Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
	$i = \frac{E}{r_1 + r_2}\left(1 + \frac{r_2 - R}{r_1 + R}\, e^{pt}\right)$; $u_C = E\,\frac{r_2}{r_1 + r_2}\,(1 - e^{pt})$; $R = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}$	$p = -\frac{1}{rC}$; $r = r_3 + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
	$i = \frac{E r_1}{(r_1 + r_2)(r_1 + r_3)}\, e^{pt}$; $u_C = E - \frac{E r_1}{r_1 + r_2}\, e^{pt}$	$p = -\frac{1}{(r_1 + r_3) C}$
	$i = \frac{E}{r_1 + r_2} + \left(\frac{E r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} - \frac{E}{r_1 + r_2}\right) e^{pt}$; $u_C = \frac{E}{r_1 + r_2}\,(r_2 + r_1\, e^{pt})$	$p = -\frac{1}{rC}$; $r = r_3 + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
	$i = \frac{U_0}{r}\, e^{pt}$; $u_{C_2} = \frac{U_0 C_1}{C_1 + C_2}\,(1 - e^{pt})$	$p = -\frac{1}{rC}$; $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$
	$i = \frac{E}{L(\alpha_1 - \alpha_2)}\,(e^{-\alpha_2 t} - e^{-\alpha_1 t})$; $u_C = E + \frac{E}{\alpha_1 - \alpha_2}\,(\alpha_2 e^{-\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{-\alpha_2 t})$; $\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$	$p_1 = -\alpha_1$; $p_2 = -\alpha_2$ (действительные числа)
$\delta = r/2L$; $\omega_0 = \frac{}{\sqrt{LC}}$	$i = \frac{E}{\omega L}\, e^{-\delta t} \sin \omega t$; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$; $u_C = E - E\,\frac{\omega_0}{\omega}\, e^{-\delta t} \cos(\omega t - \gamma)$; $\operatorname{tg} \gamma = \delta/\omega$	$p_1 = -\delta + j\omega$; $p_2 = -\delta - j\omega$
	$i = \frac{E}{L}\, t e^{-\delta t}$; $\delta = \omega_0$; $u_C = E - E(1 + \delta t)\, e^{-\delta t}$	$p_1 = p_2 = -\delta$
	$i = \frac{E}{r}\left(1 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2}\, e^{-\alpha_1 t} - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2}\, e^{-\alpha_2 t}\right)$; $u_C = E\,\frac{L}{r}\,\frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2}\,(-e^{-\alpha_1 t} + e^{-\alpha_2 t})$; $\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$	$p_1 = -\alpha_1$; $p_2 = -\alpha_2$ (действительные числа)
$\delta = \frac{1}{2rC}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$i = \frac{E}{r}\left(1 - 2\,\frac{\delta}{\omega}\, e^{-\delta t} \sin \omega t\right)$; $u_C = \frac{\omega_0 L}{r}\, E\,\frac{\omega_0}{\omega}\, e^{-\delta t} \sin \omega t$; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$	$p_1 = -\delta + j\omega$; $p_2 = -\delta - j\omega$

Продолжение табл. 4.4

Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
	$i = \frac{E}{L(\alpha_1 - \alpha_2)}\left(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}\right)$; $u_C = \frac{E}{\alpha_1 - \alpha_2}\left(\alpha_1 e^{-\alpha_2 t} - \alpha_2 e^{-\alpha_1 t}\right)$; $\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$	$p_1 = -\alpha_1$; $p_2 = -\alpha_2$ (действительные числа)
$\delta = \frac{r}{2L}$	$i = -\frac{E}{L} te^{-\delta t}$; $\delta = \omega_0$; $u_C = E(1 + \delta t)\, e^{-\delta t}$	$p_1 = p_2 = -\delta$
$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$i = -\frac{E}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t$; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$; $u_C = E\frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \cos(\omega t - \gamma)$; $\operatorname{tg} \gamma = \delta/\omega$	$p_1 = -\delta + j\omega$; $p_2 = -\delta - j\omega$
	$i = \frac{E_m}{z}\sin(\omega t + \psi_1) - \frac{E_m}{z\omega(\alpha_1 - \alpha_2)}[\alpha_1(\omega \sin\psi_1 - \alpha_2 \cos\psi_1) e^{-\alpha_1 t} - \alpha_2(\omega \sin\psi_1 - \alpha_1 \cos\psi_1) e^{-\alpha_2 t}]$; $u_C = \frac{E_m}{z\omega C}\sin(\omega t + \psi_2) + \frac{E_m}{z\omega C(\alpha_1 - \alpha_2)}[(\alpha_2 \sin\psi_2 + \omega\cos\psi_2) e^{-\alpha_1 t} - (\alpha_1 \sin\psi_2 + \omega\cos\psi_2) e^{-\alpha_2 t}]$	$p_1 = -\alpha_1$; $p_2 = -\alpha_2$ (действительные числа); $\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$
$\delta = \frac{r}{2L}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$; $\psi_1 = \psi - \varphi$; $\psi_2 = \psi_1 - \pi/2$; $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$	$i = \frac{E_m}{z}\sin(\omega t + \psi_1) + \frac{E_m}{r} e^{-\delta t} \times \left[\frac{\omega_0^2}{\omega\omega_1}\left(\cos\psi_1 + \frac{\delta}{\omega_1}\sin\psi_1\right)\sin\omega_1 t - \sin\psi_1 \cdot \cos\omega_1 t\right]$; $u_C = \frac{E_m}{z\omega C}\sin(\omega t + \psi_2) - \frac{E_m}{z\omega C} e^{-\delta t}\left[\left(\frac{\delta}{\omega_1}\sin\psi_2 + \frac{\omega}{\omega_1}\cos\psi_2\right)\sin\omega_1 t + \sin\psi_2 \cdot \cos\omega_1 t\right]$	$p_1 = -\delta + j\omega_1$; $p_2 = -\delta - j\omega_1$
	$i = \frac{E}{r}\left(1 + \frac{r/L - \alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} e^{-\alpha_1 t} - \frac{r/L - \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} e^{-\alpha_2 t}\right)$; $u_C = E + \frac{E}{\alpha_1 - \alpha_2}\left(\alpha_2 e^{-\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{-\alpha_2 t}\right)$; $\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$	$p_1 = -\alpha_1$; $p_2 = -\alpha_2$ (действительные числа)
$\delta = \frac{1}{2rC}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$i = \frac{E}{r}\left[1 + \frac{r}{\omega_1 L} e^{-\delta t}\sin\omega_1 t - \frac{\omega_0}{\omega_1} e^{-\delta t}\sin(\omega_1 t + \eta)\right]$; $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$; $u_C = E - E\frac{\omega_0}{\omega_1} e^{-\delta t}\sin(\omega_1 t + \eta)$; $\operatorname{tg}\eta = \frac{\omega_1}{\delta}$	$p_1 = -\delta + j\omega_1$; $p_2 = -\delta - j\omega_1$

Продолжение табл. 4.4

Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
	$i_L = \frac{E}{L(\alpha_2 - \alpha_1)}\left(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}\right)$; $u_C = E - \frac{E}{\alpha_1 - \alpha_2}\left(\alpha_1 e^{-\alpha_1 t} - \alpha_2 e^{-\alpha_2 t}\right)$; $\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$	$p_1 = -\alpha_1$; $p_2 = -\alpha_2$ (действительные числа)
$\delta = \frac{1}{2rC}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$i_L = \frac{E}{\omega_1 L} e^{-\delta t} \sin \omega_1 t$; $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ $u_C = E + E\frac{\omega_0}{\omega_1} e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t - \eta)$; $\operatorname{tg}\eta = \frac{\omega_1}{\delta}$	$p_1 = -\delta + j\omega_1$; $p_2 = -\delta - j\omega_1$
	$i = \frac{E}{r}\frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2}\left(\alpha_1 e^{-\alpha_1 t} - \alpha_2 e^{-\alpha_2 t}\right) - \frac{E}{L(\alpha_1 - \alpha_2)}\left(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}\right)$; $\alpha_{1,2} = \delta \mp \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$; $u_C = \frac{E}{\alpha_1 - \alpha_2}\left[\left(\frac{1}{rC} - \alpha_2\right)e^{-\alpha_1 t} - \left(\frac{1}{rC} - \alpha_1\right)e^{-\alpha_2 t}\right]$	$p_1 = -\alpha_1$; $p_2 = -\alpha_2$ (действительные числа)
$\delta = \frac{r}{2L}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$i = \frac{E}{r}\frac{\omega_0}{\omega_1} e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \eta)$; $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$; $u_C = E\frac{\omega_0^2}{2\delta\omega_1} e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + 2\eta)$; $\operatorname{tg}\eta = \frac{\omega_1}{\delta}$	$p_1 = -\delta + j\omega_1$; $p_2 = -\delta - j\omega_1$
	$i_2 = -\frac{E}{r_1}\frac{M}{L_2} e^{pt}$	$p = -\frac{r_2}{L_2}$
	$i_1 = \frac{E_1}{r_1}\left(1 + p_2\frac{1 + p_1\tau_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - p_1\frac{1 + p_2\tau_2}{p_1 - p_2} e^{p_2 t}\right)$; $i_2 = \frac{k^2 E}{(p_2 - p_1)(1 - k^2)M}\left(e^{p_2 t} - e^{p_1 t}\right)$; $\beta = \frac{1}{\tau_1\tau_2}\sqrt{(\tau_1 - \tau_2)^2 + 4k^2\tau_1\tau_2}$.	$p_{1,2} = -\frac{\tau_1 + \tau_2}{2(1 - k^2)\tau_1\tau_2} \pm \pm \frac{\beta}{2(1 - k^2)}$
$\tau_1 = \frac{L_1}{r_1}$;	При отсутствии рассеяния ($k = 1$) $i_1 = \frac{E}{r_1}\left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} e^{p_1 t}\right)$; $i_2 = \frac{E\tau_1\tau_2}{\sqrt{L_1 L_2}(\tau_1 + \tau_2)} e^{p_1 t}$	$p_1 = -\frac{1}{\tau_1 + \tau_2}$

Продолжение табл. 4.4

Схема переключения	Токи и напряжения	Корни характеристического уравнения
$\tau_2 = \frac{L_2}{r_2}$; $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$	При $k \neq 1$, $L_1 = L_2 = L$ и $r_1 = r_2 = r$ $i_1 = \frac{E}{2r}\left(2 - e^{p_1 t} - e^{p_2 t}\right)$; $i_2 = \frac{E}{2r}\left(e^{p_1 t} - e^{p_2 t}\right)$ При отсутствии рассеяния ($k = 1$) $i_1 = \frac{E}{r}\left(1 - \frac{1}{2}e^{p_1 t}\right)$; $i_2 = \frac{E}{2r}e^{p_1 t}$	$p_1 = -\frac{r}{L+M}$ $p_2 = -\frac{r}{L-M}$ $p_1 = -\frac{r}{2L}$

Принятые условные обозначения:

1. Переключение рубильников из положения *1* в положение *2* происходит мгновенно, когда режим в цепи перед переключением установился.
2. На схемах буквой e обозначены ЭДС, изменяющиеся по синусоидальному закону: $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$.
3. Угол ψ определяет ЭДС в момент коммутации $t=0$, т. е. $e(0) = E_m \sin\psi$.
4. Изменение сопротивления r происходит скачком от значения r_1 до значения r_2 (рубильник мгновенно включается или отключается).
5. $z = \sqrt{r^2 + x^2}$; $\operatorname{tg}\varphi = x/r$, где $x = \omega L - 1/\omega C$ для схем с L и C; $z_1 = \sqrt{r_1^2 + x^2}$; $\operatorname{tg}\varphi_1 = x/r_1$, где $x = \omega L$ для схем с L; $z_2 = \sqrt{r_2^2 + x^2}$; $\operatorname{tg}\varphi_2 = x/r_2$, где $x = -1/\omega C$ для схем с C.

При найденных начальных значениях $i(0)$ и $di/dt\big|_{t=0}$ находим A_1 и A_2, решая совместно (6) и (7): $A_1 = -2{,}23$ и $A_2 = 1{,}73$. Теперь в формуле (5) все неизвестные величины определены:

$$i = 1 - 2{,}23e^{-200t} + 1{,}73e^{-800t} \text{ А}.$$

Уравнения цепи можно составлять также при помощи метода контурных токов и других методов расчета цепей.

Характеристическое уравнение проще получить без совместного решения системы дифференциальных уравнений, если составить согласно методу контурных токов определитель из сопротивлений в комплексной форме для схемы после коммутации, заменить $j\omega$ на p и приравнять определитель нулю.

Пример (рис. 4.28):

$$\begin{vmatrix} r + pL & -pL \\ -pL & pL + 1/pC \end{vmatrix} = 0.$$

Это уравнение дает те же корни, что и найденные выше.

Корни характеристического уравнения одинаковы для любого тока или напряжения данной цепи (кроме схем, содержащих ветви с идеальными источниками ЭДС и без других элементов, и схем, которые после коммутации распадаются на отдельные несвязанные части). Корни могут быть найдены из уравнения

$$Z(p) = 0.$$

где $Z(p) = Z(j\omega)$ при замене $j\omega$ на p, $Z(j\omega)$ — комплексное сопротивление или вообще коэффициент пропорциональности между гармонической ЭДС (которую можно считать включенной в любую ветвь) и любым током (или напряжением) для схемы после коммутации.

Пример (рис. 4.28):

$$Z(p) = r + \frac{pL \cdot 1/pC}{pL + 1/pC} = 0,$$

если комплексное сопротивление $Z(j\omega)$ есть входное сопротивление при гармонической ЭДС, включенной в левую ветвь (вместо ЭДС E), или

$$Z(p) = pL + \frac{r \cdot 1/pC}{r + 1/pC} = 0,$$

или

$$Z(p) = \frac{1}{pC} + \frac{r \cdot pL}{r + pL} = 0.$$

Любое из полученных уравнений дает те же корни, что и найденные выше.

$Z(p)$ можно рассматривать как полное операторное сопротивление; pL — индуктивное операторное сопротивление; $1/pC$ — емкостное.

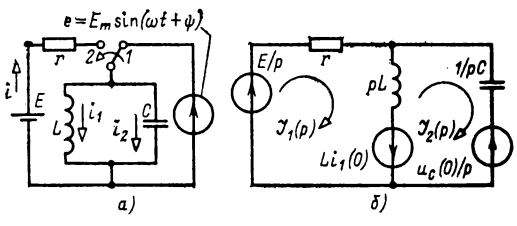


Рис. 4.28

Метод переменных состояний

Метод переменных состояния основан на решении уравнений состояния — дифференциальных уравнений первого порядка.

При расчете переходного процесса в линейной цепи с постоянными параметрами из уравнений Кирхгофа получается дифференциальное уравнение n-го порядка, записанное выше для тока i, а в общем случае для перемен-

ной x (ток, заряд, напряжение, магнитный поток и т. д.):

$$a_n d^n x/dt^n + a_{n-1} d^{n-1} x/dt^{n-1} + \ldots$$
$$\ldots + a_0 x = F(t),$$

которое сводится к системе n уравнений первого порядка введением переменных состояния $x_1=x$; $x_2=dx/dt$; ...; $x_n=d^{n-1}x/dt^{n-1}$, т. е. переменными состояния служат искомая величина x и ее производные. Уравнения состояния: $dx_1/dt=b_2x_2$; $dx_2/dt=b_3x_3$; ...; $dx_{n-1}/dt=b_nx_n$; $dx_n/dt=c_1x_1+c_2x_2+\ldots+c_nx_n+c_{n+1}F(t)$. Для решения задачи надо знать еще n начальных условий $x_k(0)$, которые зависят от независимых начальных условий. В качестве переменных состояния могут быть выбраны токи в индуктивных и напряжения на емкостных элементах. В матричной форме

$$\frac{d}{dt}\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{F}(t), \qquad (а)$$

где $\mathbf{X}$ — матрица-столбец n переменных состояния; $\mathbf{F}$ — матрица-столбец m ЭДС и токов источников; $\mathbf{A}$ — квадратная матрица порядка n; $\mathbf{B}$ — матрица связи размера $n\times m$. Для искомых (выходных) величин y_1, ..., y_l в матричной форме получается уравнение:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{M}\mathbf{X}(t) + \mathbf{N}\mathbf{F}(t), \qquad (б)$$

где $\mathbf{Y}$ — матрица-столбец искомых величин; $\mathbf{M}$ — матрица связи размера $l\times n$; $\mathbf{N}$ — матрица связи размера $l\times m$; элементы матриц $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{M}$ и $\mathbf{N}$ определяются топологией и параметрами цепи.

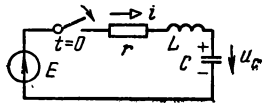


Рис. 4.29

Пример (рис. 4.29). Даны параметры цепи r, L, C, E; конденсатор был заряжен до напряжения U_0. Найти $i(t)$, $u_r(t)$.

Дифференциальные уравнения: $ri+Ldi/dt+u_C=E$; $i=Cdu_C/dt$. Переменные состояния $x_1=u_C$ и $x_2=i_L=i$. Начальные значения: $u_C(0)=U_0$; $i_L(0)=i(0)=0$.

Уравнения состояния:

$$\frac{dx_1}{dt}=\frac{du_C}{dt}=\frac{1}{C}i_L\left(b_2=\frac{1}{C}\right);$$

$$\frac{dx_2}{dt}=\frac{di_L}{dt}=-\frac{1}{L}u_C-\frac{r}{L}i_L+$$
$$+\frac{1}{L}E\left(c_1=-\frac{1}{L};\ c_2=-\frac{r}{L};\ c_3=\frac{1}{L}\right).$$

В матричной форме:

$$\mathbf{X}=\left\|\begin{matrix}u_C\\ i_L\end{matrix}\right\|;\quad \frac{d}{dt}\mathbf{X}=\left\|\begin{matrix}du_C/dt\\ di_L/dt\end{matrix}\right\|;$$

$$\mathbf{A}=\left\|\begin{matrix}0 & 1/C\\ -1/L & -r/L\end{matrix}\right\|;\quad \mathbf{B}=\left\|\begin{matrix}0\\ 1/L\end{matrix}\right\|;\quad F=\left\|\begin{matrix}0\\ E\end{matrix}\right\|;$$

$$\mathbf{Y}=\left\|\begin{matrix}i\\ u_r\end{matrix}\right\|;\quad \mathbf{M}=\left\|\begin{matrix}0 & 1\\ 0 & r\end{matrix}\right\|;\quad \mathbf{N}=0.$$

Решение уравнения (а) записывается в виде:

$$\mathbf{X}(t) = e^{\mathbf{A}t}\mathbf{X}(0) + e^{\mathbf{A}t}\int_0^t e^{\mathbf{A}\theta}\mathbf{B}\mathbf{F}(\theta)\,d\theta. \qquad (в)$$

Для вычисления матричной экспоненциальной функции сначала определяются собственные значения λ матрицы $\mathbf{A}$, т. е. корни уравнения

$$\det(\mathbf{A}-\lambda\cdot 1)=0, \qquad (г)$$

где 1 — единичная матрица порядка n; собственные значения совпадают с корнями характеристического уравнения цепи. Если они различны, то

$$e^{\mathbf{A}t}=\alpha_0(t)\cdot 1+\alpha_1(t)\mathbf{A}+\alpha_2(t)\mathbf{A}^2+\ldots$$
$$\ldots+\alpha_{n-1}(t)\mathbf{A}^{n-1},$$

где $\mathbf{A}^2=\mathbf{A}\mathbf{A}$; $\mathbf{A}^3=\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}$ и т. д., а функции $\alpha_k(t)$ определяются из алгебраической системы n уравнений:

$$\alpha_0+\lambda_1\alpha_1+\lambda_1^2\alpha_2+\ldots+\lambda_1^{n-1}\alpha_{n-1}=e^{\lambda_1 t};$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$\alpha_0+\lambda_n\alpha_1+\lambda_n^2\alpha_2+\ldots+\lambda_n^{n-1}\alpha_{n-1}=e^{\lambda_n t}.$$

Пример (рис. 4.29). Собственные значения определяются из уравнения (г)

$$\left|\begin{matrix}-\lambda & 1/C\\ -1/L & -r/L-\lambda\end{matrix}\right|=0,\ \text{откуда}\ \lambda_{1,2}=$$
$$=-\frac{r}{2L}\pm\sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2-\frac{1}{LC}}.$$

Из уравнений

$$\alpha_0+\lambda_1\alpha_1=e^{\lambda_1 t};\quad \alpha_0+\lambda_2\alpha_1=e^{\lambda_2 t}$$

получается

$$\alpha_0=\frac{\lambda_1 e^{\lambda_2 t}-\lambda_2 e^{\lambda_1 t}}{\lambda_1-\lambda_2};\quad \alpha_1=\frac{e^{\lambda_1 t}-e^{\lambda_2 t}}{\lambda_1-\lambda_2}$$

и

$$e^{\mathbf{A}t}=\alpha_0\cdot 1+\alpha_1\mathbf{A}=e^{\lambda_1 t}\frac{\mathbf{A}-\lambda_2 1}{\lambda_1-\lambda_2}-$$
$$-e^{\lambda_2 t}\frac{\mathbf{A}-\lambda_1\cdot 1}{\lambda_1-\lambda_2}.$$

Здесь

$$\mathbf{A}-\lambda_2\cdot 1=\left\|\begin{matrix}-\lambda_2 & 1/C\\ -1/L & -r/L-\lambda_2\end{matrix}\right\|=$$
$$=\left\|\begin{matrix}-\lambda_2 & 1/C\\ -1/L & \lambda_1\end{matrix}\right\|=\mathbf{A}_1;$$
$$\mathbf{A}-\lambda_1\cdot 1=\left\|\begin{matrix}-\lambda_1 & 1/C\\ -1/L & \lambda_2\end{matrix}\right\|=A_2.$$

Теперь

$$\mathbf{X}=\left\|\begin{matrix}u_C\\ i_L\end{matrix}\right\|=\frac{\mathbf{A}_1 e^{\lambda_2 t}-\mathbf{A}_2 e^{\lambda_2 t}}{\lambda_1-\lambda_2}\times$$
$$\times\left\{\mathbf{X}(0)+\int_0^t(\mathbf{A}_1 e^{\lambda_1\theta}-\mathbf{A}_2 e^{\lambda_2\theta})\left\|\begin{matrix}0\\ 1/L\end{matrix}\right\|\cdot\left\|\begin{matrix}0\\ E\end{matrix}\right\|d\theta\right\},$$

откуда, например при $U_0=0$: $i_L=\frac{E}{L(\lambda_1-\lambda_2)}(e^{\lambda_1 t}-e^{\lambda_2 t})$.

Если в цепи действует один источник ЭДС $F(t)=I(t)$ и начальные условия нулевые, то

$$\mathbf{X}(t)=\left(e^{\mathbf{A}t}-1\right)\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B};\quad \mathbf{Y}(t)=$$
$$=\mathbf{M}\left(e^{\mathbf{A}t}-1\right)\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}+\mathbf{N};$$

это переходные функции цепи.

Матричная экспоненциальная функция по определению представляется бесконечным рядом

$$e^{\mathbf{A}t}=1+\mathbf{A}t+\mathbf{A}^2\frac{t^2}{2!}+\mathbf{A}^3\frac{t^3}{3!}+\ldots$$

При ограничении конечным числом слагаемых вычисление сводится к умножению и суммированию матриц, что выполняется при помощи стандартных программ на ЭВМ.

Уравнения состояния проще всего решаются методом численного интегрирования — методом Эйлера.

Операторный метод

Операторный метод решения линейных дифференциальных уравнений не требует определения постоянных интегрирования (A_1, A_2 ..., A_n).

Если в дифференциальных уравнениях заменить все известные функции времени $f(t)$ (оригиналы) их операторными изображениями $F(p)$, найденными при помощи преобразования Лапласа (или Карсона), и все неизвестные токи i, производные di/dt и интегралы $\int_0^t i\,dt$ их операторными изображениями соответственно $I(p)$, $pI(p)-i(0)$, $I(p)/p$, то из полученной системы алгебраических уравнений (уравнений Кирхгофа в операторной форме) можно найти изображение любого неизвестного тока (или напряжения).

В общем случае изображение функции может быть найдено при помощи преобразования Лапласа

$$F(p)=\int_0^\infty f(t)\,e^{-pt}\,dt$$

[или преобразования Карсона

$$\varphi(p)=p\int_0^\infty f(t)\,e^{-pt}\,dt\ ].$$

Сокращенно эти преобразования записываются в виде $F(p)\leftrightarrow f(t)$ [или $\varphi(p)\doteq f(t)$, причем $\varphi(p)=pF(p)$].

Предполагается, что оригинал $f(t)=0$ при $t<0$, что он может иметь только конечное число точек разрыва первого рода на любом конечном интервале и при $t>0$ возрастает не быстрее экспоненты:

$$|f(t)|<Me^{s_0t},$$

где M, s_0 — постоянные.

Изображения наиболее часто встречающихся функций по Лапласу, а также производной от функции и интеграла приведены в табл. 4.5.

Далее все формулы даны для преобразования Лапласа.

По найденному изображению тока (или напряжения) сама функция может быть найдена при помощи табл. 4.5, формулы обращения (интеграл Бромвича) или вычетов:

$$f(t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{s-j\infty}^{s+j\infty}F(p)\,e^{pt}\,dp=$$
$$=\Sigma\operatorname{res}F(p)e^{pt}\ \text{при}\ p=p_k.$$

Здесь путь интегрирования представляет собой вертикальную прямую $\operatorname{Re}\ p=s>s_0>0$, ориентированную вверх. Сумма вычетов (res) берется по всем особым точкам — корням характеристического уравнения p_k.

В простом полюсе ($p=p_k$ — не кратный корень)

$$\operatorname{res}F(p)\,e^{pt}=\lim\left[(p-p_k)\,F(p)\,e^{pt}\right]\text{при}\ p\to p_k.$$

В полюсе порядка n ($p=p_k$ — кратный корень порядка n)

$$\operatorname{res}F(p)\,e^{pt}=\frac{1}{(n-1)!}\times$$
$$\times\lim_{p\to p_k}\frac{d^{n-1}}{dp^{n-1}}\left[(p-p_k)^n\,F(p)\,e^{pt}\right].$$

Для рациональных дробей может быть применена теорема разложения. Если

$$F(p)=\frac{F_1(p)}{F_2(p)}\ \text{или}\ F(p)=\frac{F_1(p)}{pF_3(p)},$$

то соответственно

$$f(t)=\sum_{k=1}^{n}\frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)}e^{p_kt}\ \text{или}\ f(t)=$$
$$=\frac{F_1(0)}{F_3(0)}+\sum_{k=1}^{n}\frac{F_1(p_k)}{p_kF_3'(p_k)}e^{p_kt},$$

где $F_1(p)$, $F_2(p)$, $F_3(p)$ — полиномы относительно p; p_k — корни уравнения $F_2(p)=0$ или $F_3(p)=0$; n — число корней; $F'(p)=dF(p)/dp$.

Формулы теоремы разложения предполагают отсутствие нулевых или кратных корней в уравнениях $F_2(p)=0$ и $F_3(p)=0$. При двух кратных корнях надо применить те же формулы, считая один из кратных корней равным $p_k+\alpha$ (α — малая величина), и затем принять $\alpha\to0$.

Аналогично можно определить $f(t)$ при любом числе кратных корней.

Пример (рис. 4.28, *а*). Уравнения (1)—(3) из примера расчета классическим методом в операторной форме:

$$-I(p)+I_1(p)+I_2(p)=0; \qquad (8)$$
$$rI(p)+pLI_1(p)-Li_1(0)=E/p; \qquad (9)$$
$$rI(p)+I_2(p)/pC+u_C(0)/p=E/p, \qquad (10)$$

где E/p — изображение заданной постоянной ЭДС; $i_1(0)$ и $u_C(0)$, как и раньше, определяются из режима до коммутации.

Таблица 4.5. **Оригиналы и изображения по Лапласу**

Оригинал $f(t)=f$	Изображение $F(p)=F$	Оригинал $f(t)=f$	Изображение $F(p)=F$
f	F	$1-(1+at)e^{-at}$	$\frac{a^2}{p(p+a)^2}$
df/dt	$pF-f(0)$		
$\int_0^t f\,dt$	F/p	$\cos\omega_0 t$	$\frac{p}{p^2+\omega_0^2}$
$1(t)$ — функция Хевисайда	$1/p$	$\sin\omega_0 t$	$\frac{\omega_0}{p^2+\omega_0^2}$
$\delta(t)$ — функция Дирака	1	$\cos(\omega_0 t+\varphi)$	$\frac{p\cos\varphi-\omega_0\sin\varphi}{p^2+\omega_0^2}$
t	$1/p^2$	$\sin(\omega_0 t+\varphi)$	$\frac{p\sin\varphi+\omega_0\cos\varphi}{p^2+\omega_0^2}$
t^n (n — целое)	$n!/p^{n+1}$	$t\cos\omega_0 t$	$\frac{p^2-\omega_0^2}{(p^2+\omega_0^2)^2}$
e^{-at}	$\frac{1}{p+a}$	$t\sin\omega_0 t$	$\frac{2\omega_0 p}{(p^2+\omega_0^2)^2}$
$1-e^{-at}$	$\frac{a}{p(p+a)}$	$e^{-at}\cos\omega_0 t$	$\frac{p+a}{(p+a)^2+\omega_0^2}$
$(1-at)e^{-at}$	$\frac{p}{(p+a)^2}$	$e^{-at}\sin\omega_0 t$	$\frac{\omega_0}{(p+a)^2+\omega_0^2}$
te^{-at}	$\frac{1}{(p+a)^2}$	$\frac{\cos at-\cos bt}{b^2-a^2}$	$\frac{p}{(p^2+a^2)(p^2+b^2)}$
$t^{n-1}e^{-at}$ (n — целое)	$\frac{(n-1)!}{(p+a)^n}$	$\operatorname{sh}\omega_0 t$	$\frac{\omega_0}{p^2-\omega_0^2}$
$\frac{e^{-bt}-e^{-at}}{a-b}$	$\frac{1}{(p+a)(p+b)}$	$\operatorname{ch}\omega_0 t$	$\frac{p}{p^2-\omega_0^2}$
$\frac{ae^{-at}-be^{-bt}}{a-b}$	$\frac{p}{(p+a)(p+b)}$		
$1+\frac{be^{-at}-ae^{-bt}}{a-b}$	$\frac{ab}{p(p+a)(p+b)}$		

Из уравнений (8)—(10)

$$I(p)=\frac{[E-u_C(0)]\,p^2LC+pLi_1(0)+E}{p(p^2LCr+pL+r)}=$$

$$=\frac{3{,}13\cdot10^{-5}p^2-2{,}75\cdot10^{-2}p+10}{p(62{,}5\cdot10^{-6}p^2+62{,}5\cdot10^{-3}p+10)}=\frac{F_1(p)}{pF_3(p)}.$$

Из уравнения $F_3(p)=0$ находим $p_1=-200$, $p_2=-800$. Затем $F_1(0)=10$; $F_3(0)=10$; $F_1(p_1)=16{,}75$; $F_1(p_2)=32{,}0$; $F_3'(p)=125\cdot10^{-6}p+62{,}5\cdot10^{-3}$; $F_3'(p_1)=375\cdot10^{-4}$; $F_3'(p_2)=-375\cdot10^{-4}$ и по теореме разложения получаем тот же ответ, что и раньше.

При помощи вычетов в трех простых полюсах $p_1=-200$; $p_2=-800$ и $p_3=0$ находим три слагаемые суммы

$$i=\Sigma\operatorname{res}I(p)\,e^{pt}$$

и получаем тот же ответ, что и ранее.

В случае применения операторного метода расчета для электрической схемы после коммутации можно составить операторную схему. На этой схеме все величины представляются в операторной форме: токи $I(p)$, напряжения $U(p)$, ЭДС $E(p)$, резистивные сопротивления r, индуктивные pL, емкостные $1/pC$. При ненулевых начальных условиях, т. е. при $i_L(0)\neq0$ и $u_C(0)\neq0$, в операторную схему включаются дополнительно источники $Li_L(0)$ и $u_C(0)/p$, как показано на операторной схеме рис. 4.28, *б*, составленной для расчета переходного процесса после коммутации в цепи на рис. 4.28, *а*.

Операторные изображения токов в операторной схеме можно найти любым из методов расчета цепей постоянного и синусоидального токов. Например, по методу контурных токов составляем два уравнения:

$$(r+pL)J_1(p)-pLJ_2(p)=E/p+Li_1(0);$$
$$-pLJ_1(p)+(pL+1/pC)J_2(p)=$$
$$=-Li_1(0)-u_C(0)/p.$$

Токи в ветвях $I(p)=J_1(p)$; $I_1(p)=J_1(p)-J_2(p)$; $I_2(p)=J_2(p)$.

Формулы Хевисайда

Формулы Хевисайда непосредственно пригодны для расчета переходного процесса в пассивной цепи, т. е. цепи, не содержащей до коммутации источников ЭДС и тока и запасов энергии (заряженных конденсаторов и индуктивных катушек с током).

При подключении к источнику ЭДС (к источнику тока) вида $E_0 e^{\alpha t}$ искомый ток (или напряжение на любом элементе цепи) может быть найден по формуле

$$i = \frac{E_0\, e^{\alpha t}}{K(\alpha)} + E_0 \sum_{k=1}^{n} \frac{e^{p_k t}}{(p_k - \alpha)\, K'(p_k)},$$

где $K(p)$ — операторное сопротивление или коэффициент пропорциональности между приложенным напряжением (током) источника и искомой величиной, т. е. величина, обратная передаточной функции в операторной форме $H(p)$; $K(\alpha)$ есть $K(p)$ при $p=\alpha$; p_k — корни уравнения $K(p)=0$; $K'(p)=dK(p)/dp$; n — число корней.

При включении источника постоянной ЭДС (постоянного тока)

$$i = \frac{E_0}{K(0)} + E_0 \sum_{k=1}^{n} \frac{e^{p_k t}}{p_k K'(p_k)},$$

где $K(0)=K(p)$ при $p=0$.

При включении источника синусоидальной ЭДС (синусоидального тока) $E_m \sin(\omega t+\psi)$

$$i = \operatorname{Im}\left[\frac{\underline{E}_m}{K(j\omega)} + \underline{E}_m \sum_{k=1}^{n} \frac{e^{p_k t}}{(p_k - j\omega)\, K'(p_k)}\right].$$

При подключении к источнику ЭДС (к источнику тока) вида Bt

$$i = \frac{B(t)}{K(0)} - \sum_{k=1}^{n} \frac{B\left(1 - e^{p_k t}\right)}{P_n^2 K'(p_k)}.$$

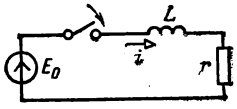


Рис. 4.30

Пример (рис. 4.30). Найти напряжение u_r на резистивном элементе с сопротивлением r, если $E_0=10$ В; $r=10$ Ом; $L=1$ Гн:

$$U_r(p) = rI(p) = \frac{rE_0}{r+pL} = \frac{E_0}{K(p)},$$

откуда

$$K(p) = (pL+r)/r; \quad K(0)=1; \quad K'(p) = L/r.$$

Характеристическое уравнение $K(p)=0$ дает один корень $p_1=-r/L=-10$ с$^{-1}$, а $K'(p_1)=0{,}1$.

Искомое напряжение

$$u_r = 10 - 10e^{-10t} \text{ В}.$$

Интеграл Дюамеля

При подключении источника ЭДС (тока) с напряжением (током) произвольной формы

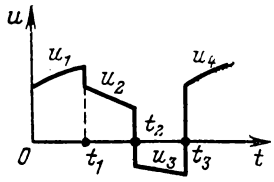


Рис. 4.31

(рис. 4.31) к пассивной цепи для $0<t<t_1$ имеем

$$a = u_1(0)\, h(t) + \int_0^t u_1'(\theta)\, h(t-\theta)\, d\theta;$$

для $t_1 < t < t_2$

$$a = u_1(0)\, h(t) + \int_0^{t_1} u_1'(\theta)\, h(t-\theta)\, d\theta + \\ + \Delta u_1\, h(t-t_1) + \int_{t_1}^{t} u_2'(\theta)\, h(t-\theta)\, d\theta;$$

аналогично для $t_2<t<t_3$ и т. д.; в частности, при $t_1 \to \infty$ первое выражение справедливо для любого t.

Здесь

$$\Delta u_1 = u_2(t_1) - u_1(t_1); \quad u'(\theta) = \left.\frac{du}{dt}\right|_{t=\theta};$$

a — искомый ток или искомое напряжение; $h(t)$ — переходная или передаточная функция — функция времени, численно равная искомому току (или напряжению), который получается при включении цепи не на заданное напряжение $u(t)$ (или ток источника), а на единичное напряжение 1 В (или ток 1 А); $h(t-\theta)$ и $h(t-t_1)$ — функция $h(t)$ при замене t соответственно на $t-\theta$ и $t-t_1$.

В частном случае, когда определяется ток, а подключается источник напряжения, функция $h(t)$ имеет размерность проводимости (переходная проводимость).

Интеграл Дюамеля может быть записан и в других эквивалентных формах.

Пример. К цепи по рис. 4.30 подключается источник ЭДС с напряжением по рис. 4.31, где $u_1=5+5t$; $t_1=0{,}1$ с; $u_2=5e^{-2(t-0{,}1)}$, $t_2 \to \infty$. Найти напряжение u_r.

Переходная функция, т. е. напряжение u_r при $U_0=1$ В (см. предыдущий пример), $h=1-1e^{-10t}$

При $0<t<t_1$

$$u_s = 5\left(1 - e^{-10t}\right) + \int_0^t 5\left[1 - e^{-10(t-\theta)}\right] d\theta = \\ = 4{,}5\left(1 - e^{-10t}\right) + 5t.$$

Аналогично проводится расчет при $t_1<t<\infty$.

Интеграл Фурье

Для непериодических функций $f(t)$, имеющих конечное число точек разрыва 1-го рода на любом конечном интервале и удовлетворя-

ющих условию абсолютной интегрируемости, справедлива интегральная формула Фурье

$$f(t)=\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\left[\int_{-\infty}^{\infty} f(\theta)\cos\omega(t-\theta)\,d\theta\right]d\omega,$$

она дает разложение функции $f(t)$ в непрерывный спектр:

$$f(t)=\int_0^{\infty} A(\omega)\cos\omega t\,d\omega+\int_0^{\infty} B(\omega)\sin\omega t\,d\omega,$$

где

$$A(\omega)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\cos\omega t\,dt;$$

$$B(\omega)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\sin\omega t\,dt;$$

$A(\omega)d\omega$ и $B(\omega)d\omega$ — бесконечно малые амплитуды косинусоидальных и синусоидальных составляющих спектра.

В комплексной форме интегральная формула (обратное преобразование)

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega)\,e^{j\omega t}\,d\omega,$$

где

$$F(j\omega)=F(\omega)\,e^{j\psi(\omega)}=\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\,e^{-j\omega t}\,dt=$$

$$=\pi[A(\omega)-jB(\omega)]$$

— прямое преобразование Фурье; $F(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика функции $f(t)$; $\psi(\omega)$ — ее фазо-частотная характеристика; $F(j\omega)$ называется спектральной плотностью.

Интеграл Фурье можно применить к расчету переходных процессов в линейных электрических цепях.

Если к пассивной цепи подключается в момент $t=0$, например, источник ЭДС $e(t)$, удовлетворяющей поставленным выше условиям, то спектральную плотность ЭДС можно найти по формуле прямого преобразования, выбрав нижний предел интегрирования равным нулю, или по формуле

$$E(j\omega)=E(p)\,|_{p=j\omega},$$

где $E(p)$ — операторное изображение ЭДС по Лапласу.

Спектральная плотность тока в любой из ветвей (или напряжения)

$$I(j\omega)=H(j\omega)\,E(j\omega),$$

где $H(j\omega)$ — передаточная функция в комплексной форме; в частности, при вычислении тока $H(j\omega)=Y(j\omega)$ — комплексная проводимость, так что $I(j\omega)$ находится известными методами (см. § 4.1).

Ток переходного процесса $i(t)$ определяется по формуле обратного преобразования или заменой $j\omega$ на p записывается изображение $I(p)$, а затем вычисляется ток $i(t)$ так же, как и в операторном методе.

Передаточная функция $H(j\omega)$ связана с переходной функцией $h(t)$ выражениями:

$$H(j\omega)=h(0)+\int_0^{\infty} h'(\theta)\,e^{-j\omega\theta}\,d\theta$$

и

$$h(t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{H(j\omega)}{\omega}\,e^{j\omega t}\,d\omega.$$

При

$$H(j\omega)=Y(j\omega)=g(\omega)-jb(\omega)$$

получаем

$$g(\omega)=\omega\int_0^{\infty} h(\theta)\sin\omega\theta\,d\theta=$$

$$=h(0)+\int_0^{\infty} h'(\theta)\cos\omega\theta\,d\theta;$$

$$b(\omega)=-\omega\int_0^{\infty} h(\theta)\cos\omega\theta\,d\theta=$$

$$=\int_0^{\infty} h'(\theta)\sin\omega\theta\,d\theta;$$

$$h(t)=g(0)-\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{b(\omega)}{\omega}\cos\omega t\,d\omega=$$

$$=\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{g(\omega)}{\omega}\sin\omega t\,d\omega.$$

Включение ветвей

Расчет переходного процесса при подключении какой-либо ветви к электрической цепи, которая рассматривается как активный двухполюсник, можно свести к включению источника ЭДС в пассивную цепь (рис. 4.32).

Ток i (напряжение) в любой ветви электрической цепи (показанной на рис. 4.32, *а*) и, в частности, в той, которая подключается, после замыкания рубильника можно рассчитать как сумму тока i_- в этой ветви до замыкания рубильника (рис. 4.32, *б*) и тока $i_{доп}$, получающегося в этой ветви при подключении к пассивной цепи при помощи рубильника источника ЭДС e, равной напряжению на рубильнике u_x до его замыкания (рис. 4.32, *в*). Для расчета цепи, представленной на рис. 4.32, *в*, т. е.

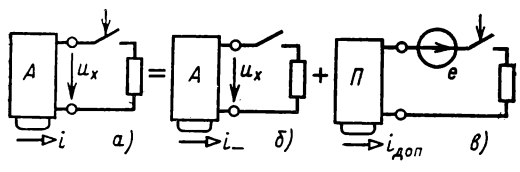


Рис. 4.32

тока $i_{доп}$, может применяться любой метод расчета переходного процесса, в частности формулы Хевисайда и интегралы Дюамеля и Фурье.

Отключение ветвей

Расчет переходного процесса при отключении какой-либо ветви электрической цепи, которая рассматривается как активный двухполюсник, можно свести к включению источника тока в пассивную цепь (рис. 4.33).

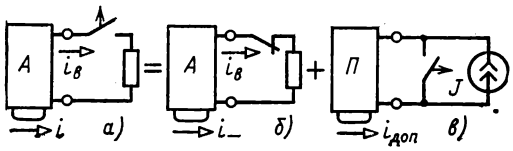


Рис. 4.33

Ток i (напряжение) в любой ветви, не содержащей индуктивного элемента и представленной на рис. 4.33, *а*, после размыкания рубильника можно найти как сумму тока i_- в ветви до размыкания рубильника (рис. 4.33, *б*) и тока $i_{доп}$, получающегося в этой ветви при включении вместо отключаемой ветви источника тока J (рис. 4.33, *в*). Источник тока включается в пассивную цепь. Ток J источника равен току $i_в$, который протекал в отключаемой ветви до размыкания рубильника.

Для расчета цепи, представленной на рис. 4.33, *в*, может применяться любой метод расчета переходных процессов и, в частности, формула Хевисайда и интегралы Дюамеля и Фурье.

Литература [4.1—4.7, 4.32—4.38].

4.5. ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ, ФИЛЬТРЫ И ЛИНИИ

Несимметричные четырехполюсники

Пассивные (не содержащие источников энергии) взаимные четырехполюсники (рис. 4.34, *а*), в частности фильтры и линии, характеризуются тремя или четырьмя параметрами. Если для характеристики четырехполюсника пользуются четырьмя параметрами, то только три из них независимы.

Основные уравнения четырехполюсника связывают режим на первичных выводах $1—1'$ с режимом на вторичных $2—2'$.

Уравнения, связывающие напряжения и токи $\underline{U}_1$, $\underline{I}_1$, $\underline{U}_2$, $\underline{I}_2$, записываются в различной форме в зависимости от выбранных параметров, например:

1. $\underline{U}_1 = \underline{A}_{11}\underline{U}_2 + \underline{A}_{12}\underline{I}_2$; $\underline{I}_1 = \underline{A}_{21}\underline{U}_2 + \underline{A}_{22}\underline{I}_2$;
2. $\underline{I}_1 = \underline{Y}_{11}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{12}\underline{U}_2$; $\underline{I}_2 = \underline{Y}_{21}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{22}\underline{U}_2$;
3. $\underline{U}_1 = \underline{Z}_{11}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{12}\underline{I}_2$; $\underline{U}_2 = \underline{Z}_{21}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{22}\underline{I}_2$;
4. $\underline{U}_1 = \underline{H}_{11}\underline{I}_1 + \underline{H}_{12}\underline{U}_2$; $\underline{I}_2 = \underline{H}_{21}\underline{I}_1 + \underline{H}_{22}\underline{U}_2$;
5. $\underline{I}_1 = \underline{G}_{11}\underline{U}_1 + \underline{G}_{12}\underline{I}_2$; $\underline{U}_2 = \underline{G}_{21}\underline{U}_1 + \underline{G}_{22}\underline{I}_2$;

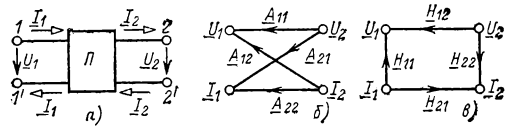


Рис. 4.34

Размерность коэффициентов в различных типах уравнений ясна из формул.

Связь между коэффициентами различных типов уравнений представлена в табл. 4.6.

Уравнения четырехполюсника могут быть записаны и в матричной форме, например:

$$\|\underline{I}\| = \|\underline{Y}\| \cdot \|\underline{U}\|,$$

где

$$\|\underline{I}\| = \begin{Vmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{Vmatrix}; \quad \|\underline{U}\| = \begin{Vmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{Vmatrix};$$

$$\|\underline{Y}\| = \begin{Vmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{Vmatrix}.$$

Для каждой системы уравнений четырехполюсника можно составить сигнальный граф. Например, для 1-й и 4-й систем уравнений графы показаны на рис. 4.34, *б* и *в*.

На рис. 4.34, *б* — истоки $\underline{U}_2$ и $\underline{I}_2$, стоки $\underline{U}_1$ и $\underline{I}_1$; на рис. 4.34, *в* — истоки $\underline{I}_1$ и $\underline{U}_2$, стоки $\underline{U}_1$ и $\underline{I}_2$.

При решении вопросов передачи информации чаще всего выбирают уравнения четырехполюсника с вторичными (характеристическими) параметрами:

$$\underline{U}_1 = \left(\sqrt{\underline{Z}_{c1}/\underline{Z}_{c2}}\,\mathrm{ch}\,\underline{\Gamma}\right)\underline{U}_2 + \left(\sqrt{\underline{Z}_{c1}\underline{Z}_{c2}}\,\mathrm{sh}\,\underline{\Gamma}\right)\underline{I}_2;$$

$$\underline{I}_1 = \left(\mathrm{sh}\,\underline{\Gamma}/\sqrt{\underline{Z}_{c1}\underline{Z}_{c2}}\right)\underline{U}_2 + \left(\sqrt{\underline{Z}_{c2}/\underline{Z}_{c1}}\,\mathrm{ch}\,\underline{\Gamma}\right)\underline{I}_2,$$

где $\underline{Z}_{c1}$, $\underline{Z}_{c2}$ — характеристические сопротивления; $\underline{\Gamma}$ — постоянная передачи.

Сопротивление $\underline{Z}_{c1}$ равно входному при питании со стороны первичных выводов $\underline{Z}_{1вх} = \underline{U}_1/\underline{I}_1$, когда сопротивление нагрузки на вторичных выводах $\underline{Z}_{н2} = \underline{Z}_{c2}$ (согласованная нагрузка); $\underline{Z}_{c2}$ равно входному при питании со стороны вторичных выводов $\underline{Z}_{2вх} = -\underline{U}_2/\underline{I}_2$, когда сопротивление нагрузки на первичных выводах $\underline{Z}_{н1} = \underline{Z}_{c1}$ (согласованная нагрузка). При питании со стороны первичных выводов постоянная (мера) передачи определяется при согласованной нагрузке ($\underline{Z}_{н2} = \underline{Z}_{c2}$):

$$\underline{Z}_{c1} = \sqrt{\frac{\underline{A}_{11}\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21}\underline{A}_{22}}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{22}}}\,\Delta_Z =$$

$$= \sqrt{\frac{\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{11}}\,\frac{1}{\Delta_Y}} = \sqrt{\frac{\underline{H}_{11}}{\underline{H}_{22}}}\,\Delta_H =$$

$$= \sqrt{\frac{\underline{G}_{22}}{\underline{G}_{11}}\,\frac{1}{\Delta_G}};$$

Таблица 4.6. **Связь коэффициентов четырехполюсников**

Тип уравнений	Коэффициенты				
	$\underline{A}$	$\underline{Y}$	$\underline{Z}$	$\underline{H}$	$\underline{G}$
$\underline{A}$	$\begin{matrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} -\frac{\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}} & \frac{1}{\underline{Y}_{21}} \\ -\frac{\Delta_Y}{\underline{Y}_{21}} & \frac{\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{21}} & \frac{\Delta_Z}{\underline{Z}_{21}} \\ \frac{1}{\underline{Z}_{21}} & \frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} -\frac{\Delta_H}{\underline{H}_{21}} & \frac{\underline{H}_{11}}{\underline{H}_{21}} \\ -\frac{\underline{H}_{22}}{\underline{H}_{21}} & \frac{1}{\underline{H}_{21}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{1}{\underline{G}_{21}} & \frac{\underline{G}_{22}}{\underline{G}_{21}} \\ \frac{\underline{G}_{11}}{\underline{G}_{21}} & \frac{\Delta_G}{\underline{G}_{21}} \end{matrix}$
$\underline{Y}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{A}_{22}}{\underline{A}_{12}} & -\frac{\Delta_A}{\underline{A}_{12}} \\ \frac{1}{\underline{A}_{12}} & \frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{12}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{Z}_{22}}{\Delta_Z} & -\frac{\underline{Z}_{12}}{\Delta_Z} \\ -\frac{\underline{Z}_{21}}{\Delta_Z} & \frac{\underline{Z}_{11}}{\Delta_Z} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{1}{\underline{H}_{11}} & -\frac{\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{11}} \\ \frac{\underline{H}_{21}}{\underline{H}_{11}} & \frac{\Delta_H}{\underline{H}_{11}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\Delta_G}{\underline{G}_{22}} & \frac{\underline{G}_{12}}{\underline{G}_{22}} \\ -\frac{\underline{G}_{21}}{\underline{G}_{22}} & \frac{1}{\underline{G}_{22}} \end{matrix}$
$\underline{Z}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{21}} & -\frac{\Delta_A}{\underline{A}_{21}} \\ \frac{1}{\underline{A}_{21}} & \frac{\underline{A}_{22}}{\underline{A}_{21}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{Y}_{22}}{\Delta_Y} & -\frac{\underline{Y}_{12}}{\Delta_Y} \\ -\frac{\underline{Y}_{21}}{\Delta_Y} & \frac{\underline{Y}_{11}}{\Delta_Y} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\Delta_H}{\underline{H}_{22}} & \frac{\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{22}} \\ -\frac{\underline{H}_{21}}{\underline{H}_{22}} & \frac{1}{\underline{H}_{22}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{1}{\underline{G}_{11}} & -\frac{\underline{G}_{12}}{\underline{G}_{11}} \\ \frac{\underline{G}_{21}}{\underline{G}_{11}} & \frac{\Delta_G}{\underline{G}_{11}} \end{matrix}$
$\underline{H}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{22}} & \frac{\Delta_A}{\underline{A}_{22}} \\ \frac{1}{\underline{A}_{22}} & -\frac{\underline{A}_{21}}{\underline{A}_{22}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{1}{\underline{Y}_{11}} & -\frac{\underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{11}} \\ \frac{\underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{11}} & \frac{\Delta_Y}{\underline{Y}_{11}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\Delta_Z}{\underline{Z}_{22}} & \frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{22}} \\ -\frac{\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{22}} & \frac{1}{\underline{Z}_{22}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \underline{H}_{11} & \underline{H}_{12} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{G}_{22}}{\Delta_G} & -\frac{\underline{G}_{12}}{\Delta_G} \\ -\frac{\underline{G}_{21}}{\Delta_G} & \frac{\underline{G}_{11}}{\Delta_G} \end{matrix}$
$\underline{G}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{A}_{21}}{\underline{A}_{11}} & \frac{\Delta_A}{\underline{A}_{11}} \\ \frac{1}{\underline{A}_{11}} & -\frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\Delta_Y}{\underline{Y}_{22}} & \frac{\underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{22}} \\ -\frac{\underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{22}} & \frac{1}{\underline{Y}_{22}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{1}{\underline{Z}_{11}} & -\frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{11}} \\ \frac{\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{11}} & \frac{\Delta_Z}{\underline{Z}_{11}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\underline{H}_{22}}{\Delta_H} & -\frac{\underline{H}_{12}}{\Delta_H} \\ -\frac{\underline{H}_{21}}{\Delta_H} & \frac{\underline{H}_{11}}{\Delta_H} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \underline{G}_{11} & \underline{G}_{12} \\ \underline{G}_{21} & \underline{G}_{22} \end{matrix}$

Здесь значения определителей:

$$\Delta_A = \underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{21}\underline{A}_{12} = -\frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{21}} = -\frac{\underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{21}} = \frac{\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{21}} = \frac{\underline{G}_{12}}{\underline{G}_{21}};$$

$$\Delta_Y = -\frac{\underline{A}_{21}}{\underline{A}_{12}} = \underline{Y}_{11}\underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{21}\underline{Y}_{12} = \frac{1}{\Delta_Z} = \frac{\underline{H}_{22}}{\underline{H}_{11}} = \frac{\underline{G}_{11}}{\underline{G}_{22}};$$

$$\Delta_Z = -\frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21}} = \frac{1}{\Delta_Y} = \underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{21}\underline{Z}_{12} = \frac{\underline{H}_{11}}{\underline{H}_{22}} = \frac{\underline{G}_{22}}{\underline{G}_{11}};$$

$$\Delta_H = -\frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{22}} = \frac{\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{11}} = \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{22}} = \underline{H}_{11}\underline{H}_{22} - \underline{H}_{21}\underline{H}_{12} = \frac{1}{\Delta_G};$$

$$\Delta_G = -\frac{\underline{A}_{22}}{\underline{A}_{11}} = \frac{\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{22}} = \frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{11}} = \frac{1}{\Delta_H} = \underline{G}_{11}\underline{G}_{22} - \underline{G}_{21}\underline{G}_{12}.$$

В случае пассивных четырехполюсников справедливы уравнения связи $\underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{21}\underline{A}_{12} = 1$; $\underline{Y}_{12} = -\underline{Y}_{21}$; $\underline{Z}_{12} = -\underline{Z}_{21}$; $\underline{H}_{21} = \underline{H}_{12}$; $\underline{G}_{21} = \underline{G}_{22}$.

Примечание. Предполагается, что положительные направления напряжений и токов выбраны такими же, как на рис. 4.34. При выборе обратного положительного направления тока $\underline{I}_2$ изменяются знаки в уравнениях четырехполюсника. В табл. 4.7 указаны знаки перед коэффициентами в уравнениях для этого случая.

Таблица 4.7

Тип уравнений	$\underline{A}$	$\underline{Y}$	$\underline{Z}$	$\underline{H}$	$\underline{G}$
Знаки	$\begin{matrix} + & - \\ + & - \end{matrix}$	$\begin{matrix} + & + \\ - & - \end{matrix}$	$\begin{matrix} + & - \\ + & - \end{matrix}$	$\begin{matrix} + & + \\ - & - \end{matrix}$	$\begin{matrix} + & - \\ + & - \end{matrix}$

$$\underline{Z}_{c2}=\sqrt{\frac{\underline{A}_{22}\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{22}\underline{A}_{11}}}=\sqrt{\frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{11}}}\Delta_Z=$$

$$=\sqrt{\frac{\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{22}}\frac{1}{\Delta_Y}}=\sqrt{\frac{\underline{H}_{11}}{\underline{H}_{22}}\frac{1}{\Delta_H}}=$$

$$=\sqrt{\frac{\underline{G}_{22}}{\underline{G}_{11}}}\Delta_G;$$

$$\underline{\Gamma}=\frac{1}{2}\ln\frac{\underline{U}_1\underline{I}_1}{\underline{U}_2\underline{I}_2}=\ln\frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2}\sqrt{\frac{\underline{Z}_{c1}}{\underline{Z}_{c2}}}=$$

$$=\ln\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}\sqrt{\frac{\underline{Z}_{c2}}{\underline{Z}_{c1}}}=\mathrm{A}+j\mathrm{B}=$$

$$=\ln\left(\sqrt{\underline{A}_{11}\underline{A}_{22}}+\sqrt{\underline{A}_{12}\underline{A}_{21}}\right),$$

где A — постоянная ослабления, Нп; B — постоянная фазы, рад.

При питании со стороны вторичных выводов получается такая же постоянная передачи.

Коэффициенты четырехполюсника выражаются через вторичные параметры:

$$\underline{A}_{11}=\sqrt{\underline{Z}_{c1}/\underline{Z}_{c2}}\,\mathrm{ch}\,\underline{\Gamma};\quad \underline{A}_{12}=\sqrt{\underline{Z}_{c1}\underline{Z}_{c2}}\,\mathrm{sh}\,\underline{\Gamma};$$

$$\underline{A}_{21}=\mathrm{sh}\,\underline{\Gamma}/\sqrt{\underline{Z}_{c1}\underline{Z}_{c2}};\quad \underline{A}_{22}=\sqrt{\underline{Z}_{c2}/\underline{Z}_{c1}}\,\mathrm{ch}\,\underline{\Gamma};$$

$$\underline{Y}_{11}=\mathrm{cth}\,\underline{\Gamma}/\underline{Z}_{c1};\quad \underline{Y}_{22}=-\mathrm{cth}\,\underline{\Gamma}/\underline{Z}_{c2};$$

$$\underline{Y}_{12}=-\underline{Y}_{21}=-1/\sqrt{\underline{Z}_{c1}\underline{Z}_{c2}}\,\mathrm{sh}\,\underline{\Gamma};$$

$$\underline{Z}_{11}=\underline{Z}_{c1}\,\mathrm{cth}\,\underline{\Gamma};\quad \underline{Z}_{22}=-\underline{Z}_{c2}\,\mathrm{ctg}\,\underline{\Gamma};$$

$$\underline{Z}_{12}=-\underline{Z}_{21}=-\sqrt{\underline{Z}_{c1}\underline{Z}_{c2}}/\mathrm{sh}\,\underline{\Gamma}.$$

Коэффициенты и параметры четырехполюсника могут быть определены опытным путем. Если $\underline{Z}_{1x}$ и $\underline{Z}_{1к}$ — входные сопротивления со стороны первичных выводов при разомкнутых (холостой ход) и короткозамкнутых вторичных, $\underline{Z}_{2x}$ и $\underline{Z}_{2к}$ входные сопротивления со стороны вторичных выводов при разомкнутых и при короткозамкнутых первичных, то

$$\underline{Z}_{1к}/\underline{Z}_{1x}=\underline{Z}_{2к}/\underline{Z}_{2x}$$

и

$$\underline{A}_{11}=\sqrt{\underline{Z}_{1x}/(\underline{Z}_{2x}-\underline{Z}_{2к})};\quad \underline{A}_{12}=\underline{Z}_{2к}\underline{A}_{11};$$

$$\underline{A}_{21}=1/\sqrt{\underline{Z}_{1x}(\underline{Z}_{2x}-\underline{Z}_{2к})};\quad \underline{A}_{22}=\underline{Z}_{2x}\underline{A}_{21};$$

$$\underline{Z}_{c1}=\sqrt{\underline{Z}_{1к}\underline{Z}_{1x}};\quad \underline{Z}_{c2}=\sqrt{\underline{Z}_{2к}\underline{Z}_{2x}};$$

$$\mathrm{th}\,\underline{\Gamma}=\sqrt{\underline{Z}_{1к}/\underline{Z}_{1x}}=\sqrt{\underline{Z}_{2к}/\underline{Z}_{2x}}.$$

Наиболее часто применяются Т- и П-образные схемы замещения. Для Т-образной схемы замещения (рис. 4.35, *а*)

$$\underline{A}_{11}=\frac{\underline{Z}_1+\underline{Z}_3}{\underline{Z}_3};\quad \underline{A}_{12}=\frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}+\underline{Z}_1+\underline{Z}_2;$$

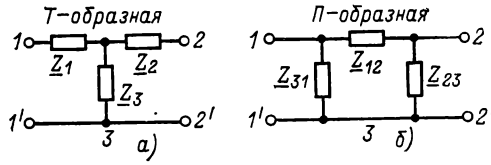


Рис. 4.35

$$\underline{A}_{21}=\frac{1}{\underline{Z}_3};\quad \underline{A}_{22}=\frac{\underline{Z}_2+\underline{Z}_3}{\underline{Z}_3};$$

$$\underline{Y}_{11}=\frac{\underline{Z}_2+\underline{Z}_3}{\underline{\rho}};\quad \underline{Y}_{22}=-\frac{\underline{Z}_1+\underline{Z}_3}{\underline{\rho}};$$

$$\underline{Y}_{12}=-\underline{Y}_{21}=-\underline{Z}_3/\underline{\rho},$$

где

$$\underline{\rho}=\underline{Z}_1\underline{Z}_2+\underline{Z}_2\underline{Z}_3+\underline{Z}_3\underline{Z}_1;$$

$$\underline{Z}_{11}=\underline{Z}_1+\underline{Z}_3;\quad \underline{Z}_{12}=-\underline{Z}_{21}=-\underline{Z}_3;$$

$$\underline{Z}_{22}=-(\underline{Z}_2+\underline{Z}_3);\quad \underline{Z}_1=\frac{\underline{A}_{11}-1}{\underline{A}_{21}};$$

$$\underline{Z}_2=\frac{\underline{A}_{22}-1}{\underline{A}_{21}};\quad \underline{Z}_3=\frac{1}{\underline{A}_{21}}.$$

Для П-образной схемы замещения (рис. 4.35, *б*)

$$\underline{A}_{11}=\frac{\underline{Z}_{23}+\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{23}};\quad \underline{A}_{12}=\underline{Z}_{12};$$

$$\underline{A}_{21}=\frac{\underline{Z}_{12}+\underline{Z}_{23}+\underline{Z}_{31}}{\underline{Z}_{23}\underline{Z}_{31}};$$

$$\underline{A}_{22}=\frac{\underline{Z}_{31}+\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{31}};\quad \underline{Y}_{11}=\frac{1}{\underline{Z}_{12}}+\frac{1}{\underline{Z}_{31}};$$

$$\underline{Y}_{12}=-\underline{Y}_{21}=-\frac{1}{\underline{Z}_{12}};$$

$$\underline{Y}_{22}=-\left(\frac{1}{\underline{Z}_{12}}+\frac{1}{\underline{Z}_{23}}\right);$$

$$\underline{Z}_{11}=\underline{m}\,\underline{Z}_{31}(\underline{Z}_{12}+\underline{Z}_{23});$$

$$\underline{Z}_{12}=-\underline{Z}_{21}=-\underline{m}\,\underline{Z}_{31}\underline{Z}_{23};$$

$$\underline{Z}_{22}=-\underline{m}\,\underline{Z}_{23}(\underline{Z}_{12}+\underline{Z}_{31}),$$

где $\underline{m}=1/(\underline{Z}_{12}+\underline{Z}_{23}+\underline{Z}_{31})$;

$$\underline{Z}_{12}=\underline{A}_{12};\quad \underline{Z}_{23}=\frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11}-1};$$

$$\underline{Z}_{31}=\frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{22}-1}$$

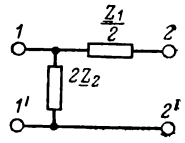


Рис. 4.36

Для простого Г-образного четырехполюсника (рис. 4.36)

$$\underline{A}_{11}=1;\quad \underline{A}_{12}=\underline{Z}_1/2;\quad \underline{A}_{21}=1/2\underline{Z}_2;$$
$$\underline{A}_{22}=1+\underline{Z}_1/4\underline{Z}_2;$$
$$\underline{Y}_{11}=(\underline{Z}_1+4\underline{Z}_2)/2\underline{Z}_1\underline{Z}_2;\quad \underline{Y}_{12}=-\underline{Y}_{21}=$$
$$=-2/\underline{Z}_1;\quad \underline{Y}_{22}=-2/\underline{Z}_1;$$
$$\underline{Z}_{11}=2\underline{Z}_2;\quad \underline{Z}_{12}=-\underline{Z}_{21}=-2\underline{Z}_2;$$
$$\underline{Z}_{22}=-(\underline{Z}_1/2+2\underline{Z}_2);$$
$$\underline{Z}_{c1}=\sqrt{\underline{Z}_1\underline{Z}_2/(1+\underline{Z}_1/4\underline{Z}_2)};$$
$$\underline{Z}_{c2}=\sqrt{\underline{Z}_1\underline{Z}_2(1+\underline{Z}_1/4\underline{Z}_2)};$$
$$\operatorname{ch}\underline{\Gamma}=\sqrt{1+\underline{Z}_1/4\underline{Z}_2}.$$

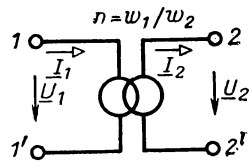


Рис. 4.37

Для идеального трансформатора (рис. 4.37)

$$\underline{A}_{11}=n\sqrt{\underline{Z}_{c1}/\underline{Z}_{c2}};\quad \underline{A}_{12}=0;\quad \underline{A}_{21}=0;$$
$$\underline{A}_{22}=1/n=\sqrt{\underline{Z}_{c2}/\underline{Z}_{c1}};\quad \underline{Z}_{1\text{вх}}=n^2\underline{Z}_{\text{н}2};$$
$$\underline{\Gamma}=0.$$

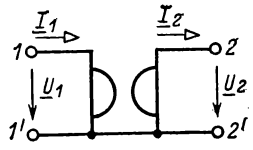


Рис. 4.38

Для гиратора (рис. 4.38) — специального пассивного невзаимного четырехполюсника ($\Delta_A\neq 1$; $\underline{Y}_{21}\neq-\underline{Y}_{12}$) с параметрами $\underline{A}_{11}=0$; $\underline{A}_{12}=R$; $\underline{A}_{21}=1/R$; $\underline{A}_{22}=0$ или $\underline{Y}_{11}=0$; $\underline{Y}_{12}=1/R$; $\underline{Y}_{21}=1/R$; $\underline{Y}_{22}=0$, где R — резистивное сопротивление; при сопротивлении нагрузки $\underline{Z}_{\text{н}}$ входное сопротивление $\underline{Z}_{1\text{вх}}=R^2/\underline{Z}_{\text{н}}$.

Пассивные симметричные четырехполюсники

У симметричного четырехполюсника (например, двухпроводной однородной линии) перемена местами первичных и вторичных выводов не изменяет режима работы источника питания и приемника:

$$\underline{A}_{11}=\underline{A}_{22};\quad \underline{Y}_{11}=-\underline{Y}_{22};\quad \underline{Z}_{11}=-\underline{Z}_{22};$$
$$\underline{Z}_{1\text{к}}=\underline{Z}_{2\text{к}}=\underline{Z}_{\text{к}};\quad \underline{Z}_{1\text{х}}=\underline{Z}_{2\text{х}}=\underline{Z}_{\text{х}};$$
$$\underline{Z}_{c1}=\underline{Z}_{c2}=\underline{Z}_c.$$

Уравнения четырехполюсника и расчетные формулы упрощаются. Например, уравнения с вторичными параметрами:

$$\underline{U}_1=\underline{U}_2\operatorname{ch}\underline{\Gamma}+\underline{I}_2\underline{Z}_c\operatorname{sh}\underline{\Gamma};\quad \underline{I}_1=\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c}\operatorname{sh}\underline{\Gamma}+$$
$$+\underline{I}_2\operatorname{ch}\underline{\Gamma},$$

где *при согласованной нагрузке* $\underline{Z}_{\text{н}}=\underline{Z}_c$ и $\underline{Z}_{\text{вх}}=\underline{Z}_c=\sqrt{\underline{A}_{12}/\underline{A}_{21}}$ и питании со стороны первичных выводов

$$\underline{\Gamma}=\ln(\underline{U}_1/\underline{U}_2)=\ln(\underline{I}_1/\underline{I}_2)=\text{A}+j\text{B}=$$
$$=\ln\left(\underline{A}_{11}+\sqrt{\underline{A}_{12}\underline{A}_{21}}\right);$$
$$\text{A}=\ln(U_1/U_2)=\ln(I_1/I_2)=\frac{1}{2}\ln(S_1/S_2)=$$
$$=\frac{1}{2}\ln(P_1/P_2)\quad[\text{Нп}];$$
$$\text{A}=20\lg(U_1/U_2)=20\lg(I_1/I_2)=$$
$$=10\lg(P_1/P_2)\quad[\text{дБ}];$$

B — угол сдвига фаз между напряжениями или токами на входе и выходе при согласованной нагрузке.

Коэффициенты четырехполюсника выражаются через вторичные параметры:

$$\underline{A}_{11}=\underline{A}_{22}=\operatorname{ch}\underline{\Gamma};\quad \underline{A}_{12}=\underline{Z}_c\operatorname{ch}\underline{\Gamma};$$
$$\underline{A}_{21}=\operatorname{sh}\underline{\Gamma}/\underline{Z}_c;$$
$$\underline{Y}_{11}=-\underline{Y}_{22}=\operatorname{cth}\underline{\Gamma}/\underline{Z}_c;$$
$$\underline{Y}_{21}=-\underline{Y}_{12}=1/\underline{Z}_c\operatorname{sh}\underline{\Gamma};$$
$$\underline{Z}_{11}=-\underline{Z}_{22}=\underline{Z}_c\operatorname{cth}\underline{\Gamma};$$
$$\underline{Z}_{21}=-\underline{Z}_{12}=\underline{Z}_c/\operatorname{sh}\underline{\Gamma}.$$

Если известны сопротивления холостого хода $\underline{Z}_{\text{х}}$ и короткого замыкания $\underline{Z}_{\text{к}}$, то

$$\underline{A}_{11}=\underline{A}_{22}=\sqrt{\underline{Z}_{\text{х}}/(\underline{Z}_{\text{х}}-\underline{Z}_{\text{к}})};$$
$$\underline{A}_{12}=\underline{Z}_{\text{к}}\sqrt{\underline{Z}_{\text{х}}/(\underline{Z}_{\text{х}}-\underline{Z}_{\text{к}})};$$
$$\underline{A}_{21}=1/\sqrt{\underline{Z}_{\text{х}}(\underline{Z}_{\text{х}}-\underline{Z}_{\text{к}})};$$
$$\underline{Z}_c=\sqrt{\underline{Z}_{\text{х}}\underline{Z}_{\text{к}}};$$
$$\operatorname{th}\underline{\Gamma}=\operatorname{th}(\text{A}+j\text{B})=\sqrt{\underline{Z}_{\text{к}}/\underline{Z}_{\text{х}}}=Te^{j\tau};$$
$$\text{A}=\frac{1}{2}\ln W;\quad \text{B}_1=\frac{\xi}{2};\quad \text{B}_2=\frac{\xi}{2}+\pi$$

(для значения), где

$$W=\left|\frac{1+T\angle\tau}{1-T\angle\tau}\right|;\quad \xi=\arg\frac{1+T\angle\tau}{1-T\angle\tau}.$$

Таблица 4.8. **Коэффициенты и параметры симметричных четырехполюсников**

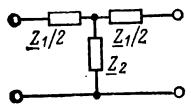
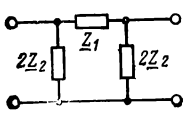
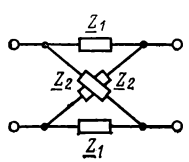
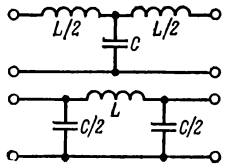
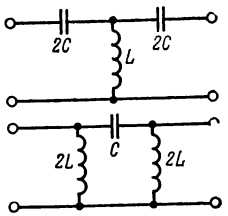
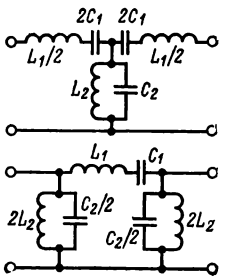
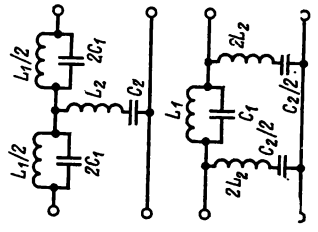
Схема	Коэффициенты $\underline{A}$	Коэффициенты $\underline{Y}$	Коэффициенты $\underline{Z}$	Параметры	Сопротивления
	$\underline{A}_{11} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2} = \underline{A}_{22}$; $\underline{A}_{12} = \underline{Z}_1\left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2}\right)$; $\underline{A}_{21} = 1/\underline{Z}_2$	$\underline{Y}_{11} = -\underline{Y}_{22} = \frac{2\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1(\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2)}$; $\underline{Y}_{21} = -\underline{Y}_{12} = \frac{4\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1(\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2)}$	$\underline{Z}_{11} = -\underline{Z}_{22} = \frac{\underline{Z}_1}{2} + \underline{Z}_2$; $\underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_2$	$\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_1\underline{Z}_2\left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2}\right)}$; $\operatorname{ch}\underline{\Gamma} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2}$; $\operatorname{sh}\frac{\underline{\Gamma}}{2} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2}}$	$\frac{\underline{Z}_1}{2} = \frac{\underline{A}_{11} - 1}{\underline{A}_{21}} = \underline{Z}_c\frac{\operatorname{ch}\underline{\Gamma} - 1}{\operatorname{sh}\underline{\Gamma}} = \underline{Z}_c \operatorname{th}\frac{\underline{\Gamma}}{2}$; $\underline{Z}_2 = \frac{1}{\underline{A}_{21}} = \frac{\underline{Z}_c}{\operatorname{ch}\underline{\Gamma}}$
	$\underline{A}_{11} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2} = \underline{A}_{22}$; $\underline{A}_{12} = \underline{Z}_1$; $\underline{A}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_2}\left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2}\right)$	$\underline{Y}_{11} = -\underline{Y}_{22} = \frac{1}{2\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_1}$; $\underline{Y}_{21} = -\underline{Y}_{12} = \frac{1}{\underline{Z}_1}$	$\underline{Z}_{11} = -\underline{Z}_{22} = \frac{(2\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2)\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2}$; $\underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_{12} = \frac{4\underline{Z}_2^2}{\underline{Z}_1 + 4\underline{Z}_2}$	$\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_1\underline{Z}_2\frac{1}{1 + \underline{Z}_1/4\underline{Z}_2}}$; $\operatorname{ch}\underline{\Gamma} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2}$; $\operatorname{sh}\frac{\underline{\Gamma}}{2} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1}{4\underline{Z}_2}}$	$\underline{Z}_1 = \underline{A}_{12} = \underline{Z}_c \operatorname{sh}\underline{\Gamma}$; $2\underline{Z}_2 = \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11} - 1} = \frac{\underline{Z}_c \operatorname{sh}\underline{\Gamma}}{\operatorname{ch}\underline{\Gamma} - 1} = \underline{Z}_c \operatorname{cth}\frac{\underline{\Gamma}}{2}$
	$\underline{A}_{11} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1} = \underline{A}_{22}$; $\underline{A}_{12} = \frac{2\underline{Z}_1\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1}$; $\underline{A}_{21} = \frac{2}{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1}$	$\underline{Y}_{11} = -\underline{Y}_{22} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2\underline{Z}_1}$; $\underline{Y}_{21} = -\underline{Y}_{12} = \frac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2\underline{Z}_1}$	$\underline{Z}_{11} = -\underline{Z}_{22} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}{2}$; $\underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_{12} = \frac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1}{2}$	$\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_1\underline{Z}_2}$; $\operatorname{ch}\underline{\Gamma} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1}$; $\operatorname{th}\frac{\underline{\Gamma}}{2} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2}}$	$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}_{11} - 1}{\underline{A}_{21}} = \underline{Z}_c \operatorname{th}\frac{\underline{\Gamma}}{2}$; $\underline{Z}_2 = \frac{\underline{A}_{11} + 1}{\underline{A}_{21}} = \underline{Z}_c \operatorname{cth}\frac{\underline{\Gamma}}{2}$

Таблица 4.9. **Фильтры типа k**

Название фильтра	Схема	Полоса пропускания	Постоянная ослабления	Постоянная фазы	Характеристическое сопротивление	L и C при заданном параметре k и частотах f_1 и f_2
Низкочастотный $k=\sqrt{L/C}$		$f_1 < f < f_2$; $f_1 = 0$; $f_2 = \dfrac{1}{\pi\sqrt{LC}}$	$\operatorname{ch}\dfrac{A}{2} = \dfrac{f}{f_2}$	$\sin\dfrac{B}{2} = \dfrac{f}{f_2}$	$k\sqrt{1-f^2/f_2^2}$; $\dfrac{k}{\sqrt{1-f^2/f_2^2}}$	$L = \dfrac{k}{\pi f_2}$; $C = \dfrac{1}{\pi f_2 k}$
Высокочастотный $k=\sqrt{L/C}$		$f_1 < f < f_2$; $f_1 = \dfrac{1}{4\pi\sqrt{LC}}$; $f_2 \to \infty$	$\operatorname{ch}\dfrac{A}{2} = \dfrac{f_1}{f}$	$\sin\dfrac{B}{2} = -\dfrac{f_1}{f}$	$k\sqrt{1-f_1^2/f^2}$; $\dfrac{k}{\sqrt{1-f_1^2/f^2}}$	$L = \dfrac{k}{4\pi f_1}$; $C = \dfrac{1}{4\pi f_1 k}$
Полосовой $k=\sqrt{L_2/C_1}$		$f_1 < f < f_2$; $f_{1,2} = f_0\left(\sqrt{1+n^2} \mp n\right)$; $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$ $n^2 = L_2/L_1 = C_1/C_2$; $f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$	$\operatorname{ch} A = \dfrac{\left(\dfrac{f}{f_0} - \dfrac{f_0}{f}\right)^2}{2n^2} - 1 = 1 - \dfrac{(f/f_0 - f_0/f)^2}{2n^2}$	$\cos B = \dfrac{(f/f_0 - f_0/f)^2}{2n^2}$	$k\sqrt{1-\dfrac{(f/f_0 - f_0/f)^2}{4n^2}}$; $\dfrac{k}{\sqrt{1-\dfrac{(f/f_0 - f_0/f)^2}{4n^2}}}$	$L_1 = \dfrac{k}{\pi(f_2 - f_1)}$; $C_1 = \dfrac{f_2 - f_1}{4\pi k f_2 f_1}$; $L_2 \dfrac{k(f_2 - f_1)}{4\pi f_2 f_1}$; $C_2 = \dfrac{1}{\pi k (f_2 - f_1)}$

Продолжение табл. 4.9

Название фильтра	Схема	Полоса пропускания	Постоянная ослабления	Постоянная фазы	Характеристическое сопротивление	L и C при заданном параметре k и частотах f_1 и f_2
Заграждающий $k=\sqrt{L_1/C_2}$		$0 \leqslant f < f_1;\ f_2 < f < \infty;$ $f_{1,2}=f_0\dfrac{\sqrt{1+16n^2}\mp 1}{4n};$ $f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}};$ $n^2=L_2/L_1=C_1/C_2;$ $f_0=\sqrt{f_1f_2}$	$\operatorname{ch}A=\dfrac{1}{2n^2\left(\dfrac{f}{f_0}-\dfrac{f_0}{f}\right)^2}-1$	$\cos B=1-\dfrac{1}{2n^2(f/f_0-f_0/f)^2}$	$k\sqrt{1-\dfrac{1}{4n^2(f/f_0-f_0/f)^2}};$ $\dfrac{k}{\sqrt{1-\dfrac{1}{4n^2(f/f_0-f_0/f)^2}}}$	$L_1=\dfrac{(f_2-f_1)k}{\pi f_1f_2};$ $C_1=\dfrac{1}{4\pi k(f_2-f_1)};$ $L_2=\dfrac{k}{4\pi(f_2-f_1)};$ $C_2=\dfrac{f_2-f_1}{\pi kf_2f_1}$

Примечания: 1. Полоса пропускания определена при согласованной нагрузке. 2. В полосе пропускания постоянная ослабления A=0. 3. В полосе пропускания постоянная фазы B=+180 или −180°. 4. Индуктивность L и емкость C — соответственно в генри и фарадах при частоте в герцах.

Наиболее часто применяют Т-, П-образные и мостовые (Х-образные) схемы замещения. Коэффициенты и параметры этих схем даны в табл. 4.8.

Входное сопротивление симметричного четырехполюсника при сопротивлении нагрузки $\underline{Z}_н$

$$\underline{Z}_{вх}=\frac{\underline{A}_{11}\underline{Z}_н+\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21}\underline{Z}_н+\underline{A}_{11}}=\underline{Z}_c\frac{\underline{Z}_н+\underline{Z}_c\operatorname{th}\underline{\Gamma}}{\underline{Z}_c+\underline{Z}_н\operatorname{th}\underline{\Gamma}}=$$

$$=\underline{Z}_x\frac{\underline{Z}_н+\underline{Z}_к}{\underline{Z}_н+\underline{Z}_x}.$$

В частности, $\underline{Z}_x=\underline{Z}_c\operatorname{cth}\underline{\Gamma}$; $\underline{Z}_к=\underline{Z}_c\operatorname{th}\underline{\Gamma}$.

LC-фильтры

В табл. 4.9 приведены расчетные формулы Т- и П-образных звеньев фильтров типа k, у которых произведение суммарного продольного сопротивления $\underline{Z}_1$ на суммарное поперечное $\underline{Z}_2$ не зависит от частоты, т. е. $\underline{Z}_1\underline{Z}_2=k^2$. У Г-образного полузвена постоянные ослабления A и фазы B вдвое меньше, чем A и B у Т- или П-образного звена, характеристическое сопротивление $\underline{Z}_{c1}$ такое же, как у П-образного, и $\underline{Z}_{c2}$ такое же, как у Т-образного.

rC-фильтры (безындуктивные)

На рис. 4.39, *а* показано Т-образное звено и Г-образное полузвено низкочастотного фильтра. Постоянная передачи $\underline{\Gamma}$ определяется из уравнения $\underline{A}_{11}=\operatorname{ch}\underline{\Gamma}=1+j\omega Cr/2$, постоянная ослабления

$$\operatorname{sh}A=$$

$$=\sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{\omega Cr}{2}\right)^2+\frac{\omega Cr}{2}\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{\omega Cr}{2}\right)^2}}$$

и при малых частотах $(\omega Cr/2\ll 1)\operatorname{sh}A\approx\sqrt{\omega Cr/2}\approx A$. Граничной частотой (среза) считают частоту $\omega_c=4/rC$, при которой постоянная ослабления A=1,54 Нп=13,5 дБ.

На рис. 4.39, *б* показано Т-образное звено

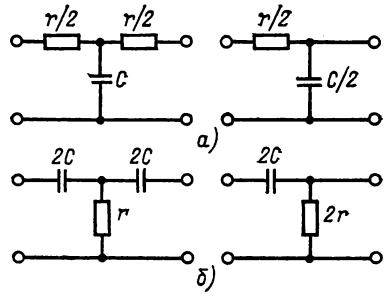


Рис. 4.39

и Г-образное полузвено высокочастотного фильтра, для которого

$$\underline{A}_{11} = \operatorname{ch}\underline{\Gamma} = 1 - j/2\omega Cr; \quad \operatorname{sh} A =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2\omega Cr}\right) + \frac{1}{2\omega Cr}\sqrt{1 + \frac{1}{4}\left(\frac{1}{2\omega Cr}\right)^2}}$$

и при высоких частотах $(1/2\omega Cr \ll 1)\operatorname{sh} A \approx \sqrt{1/2\,\omega Cr} \approx A$. Частота среза $\omega_c = 1/4rC$, при которой $A = 1{,}54$ Нп $= 13{,}4$ дБ.

Цепные схемы и другие соединения четырехполюсников

Чаще всего встречается каскадное соединение четырехполюсников, когда входные выводы последующего соединяются с выходными предыдущего. Каскадное соединение нескольких одинаковых четырехполюсников — звеньев образует цепную схему (цепочку).

Связь напряжений и токов всей цепочки удобно записывать с вторичными параметрами: $\underline{Z}_{\text{ц}}$ — характеристическое сопротивление цепочки и $\underline{\Gamma}_{\text{ц}}$ — постоянная передачи цепочки, так как они просто выражаются через $\underline{Z}_c$ и $\underline{\Gamma}$ звена: $\underline{Z}_{\text{ц}} = \underline{Z}_c$ и $\underline{\Gamma}_{\text{ц}} = \underline{\Gamma} n$, где n — число звеньев.

Напряжение и ток на входе:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch}\underline{\Gamma}_{\text{ц}} + \underline{I}_2 \underline{Z}_{\text{ц}} \operatorname{sh}\underline{\Gamma}_{\text{ц}};$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{\text{ц}}} \operatorname{sh}\underline{\Gamma}_{\text{ц}} + \underline{I}_2 \operatorname{ch}\underline{\Gamma}_{\text{ц}},$$

где $\underline{U}_2$, $\underline{I}_2$ — напряжение и ток на выходе.

Чтобы найти напряжение и ток не на входе цепочки, а на выходе k-го промежуточного звена, надо в уравнениях заменить $\underline{\Gamma}_{\text{ц}}$ на $(n-k)\underline{\Gamma}$.

При соединении в каскад несимметричных четырехполюсников часто выполняется принцип согласования. Это значит, что $\underline{Z}_{c2}$ каждого предыдущего четырехполюсника равно $\underline{Z}_{c1}$ следующего за ним. Если последний четырехполюсник имеет согласованную нагрузку, т. е. для него $\underline{Z}_{\text{н}} = \underline{Z}_{c2}$, то все соединение имеет согласованную нагрузку: входное сопротивление $\underline{Z}_{\text{вх}}$ равно $\underline{Z}_{c1}$ первого четырехполюсника и постоянная передачи равна сумме постоянных всех четырехполюсников.

При соединении в каскад произвольных четырехполюсников (рис. 4.40, *а*) определение параметров или коэффициентов соединения усложняется и проще выполняется методами матричного исчисления или с применением сигнальных графов.

Пример. Два четырехполюсника с коэффициентами $\underline{A}'_{11}$, $\underline{A}'_{12}$, $\underline{A}'_{21}$, $\underline{A}'_{22}$ и $\underline{A}''_{11}$, $\underline{A}''_{12}$, $\underline{A}''_{21}$, $\underline{A}''_{22}$ соединены в каскад (рис. 4.40, *а*). Найти коэффициенты полученного результирующего четырехполюсника.

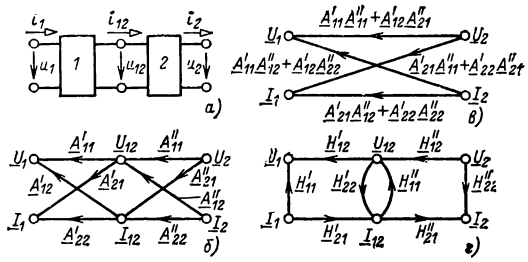


Рис. 4.40

Уравнения первого и второго четырехполюсников в матричной форме

$$\left\| \begin{matrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{matrix} \right\| = \|\underline{A}_1\| \cdot \left\| \begin{matrix} \underline{U}_{12} \\ \underline{I}_{12} \end{matrix} \right\| \text{ и } \left\| \begin{matrix} \underline{U}_{12} \\ \underline{I}_{12} \end{matrix} \right\| = \|\underline{A}_2\| \cdot \left\| \begin{matrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{matrix} \right\|,$$

где

$$\|\underline{A}_1\| = \left\| \begin{matrix} \underline{A}'_{11} & \underline{A}'_{12} \\ \underline{A}'_{21} & \underline{A}'_{22} \end{matrix} \right\|; \quad \|\underline{A}_2\| = \left\| \begin{matrix} \underline{A}''_{11} & \underline{A}''_{12} \\ \underline{A}''_{21} & \underline{A}''_{22} \end{matrix} \right\|,$$

откуда

$$\left\| \begin{matrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{matrix} \right\| = \|\underline{A}_1\| \cdot \|\underline{A}_2\| \cdot \left\| \begin{matrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{matrix} \right\|.$$

Для полученного четырехполюсника

$$\left\| \begin{matrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{matrix} \right\| = \|\underline{A}\| \cdot \left\| \begin{matrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{matrix} \right\|, \text{ т. е. } \|\underline{A}\| = \|\underline{A}_1\| \cdot \|\underline{A}_2\|,$$

или

$$\left\| \begin{matrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{matrix} \right\| = \left\| \begin{matrix} \underline{A}'_{11} & \underline{A}'_{12} \\ \underline{A}'_{21} & \underline{A}'_{22} \end{matrix} \right\| \cdot \left\| \begin{matrix} \underline{A}''_{11} & \underline{A}''_{12} \\ \underline{A}''_{21} & \underline{A}''_{22} \end{matrix} \right\|.$$

По правилу умножения матриц

$$\underline{A}_{11} = \underline{A}'_{11}\underline{A}''_{11} + \underline{A}'_{12}\underline{A}''_{21}; \quad \underline{A}_{12} = \underline{A}'_{11}\underline{A}''_{12} + \underline{A}'_{12}\underline{A}''_{22};$$

$$\underline{A}_{21} = \underline{A}'_{21}\underline{A}''_{11} + \underline{A}'_{22}\underline{A}''_{21}; \quad \underline{A}_{22} = \underline{A}'_{21}\underline{A}''_{12} + \underline{A}'_{22}\underline{A}''_{22}.$$

Те же значения коэффициентов соединения $\underline{A}_{11}$, $\underline{A}_{12}$, $\underline{A}_{21}$, $\underline{A}_{22}$ получаются при помощи сигнальных графов. На рис. 4.40, *б* показаны графы первого и второго четырехполюсников и в соответствии с рис. 4.40, *а* объединены истоки первого и стоки второго четырехполюсников в промежуточные узлы $\underline{U}_{12}$ и $\underline{I}_{12}$. После устранения этих промежуточных узлов по правилам, показанным на рис. 4.20, *б* и 4.22, *а*, получается граф по рис. 4.40, *в*.

На рис. 4.40, *г* показаны графы первого и второго четырехполюсников, когда для каждого из них записана четвертая система уравнений. Элементы матрицы $\underline{H}$ нового четырехполюсника можно определить и без преобразования графа по топологической формуле (Мэзона).

Граф имеет один контур из ветвей с передачами $\underline{H}'_{22}$ и $\underline{H}''_{11}$, т. е. определитель $\underline{\Delta} = 1 - \underline{H}'_{22}\underline{H}''_{11}$. При определении, например, элемента $\underline{H}_{11} = \underline{U}_1/\underline{I}_1$ нужно еще вычислить передачи $\underline{\Pi}_k$ прямых путей между истоком $\underline{I}_1$ и стоком $\underline{U}_1$ и определители $\underline{\Delta}_k$. Между истоком $\underline{I}_1$ и стоком $\underline{U}_1$ два прямых пути: первый с передачей $\underline{\Pi}_1 = \underline{H}'_{11}$ и с определителем $\underline{\Delta}_1 = 1 - \underline{H}'_{22}\underline{H}''_{11}$ (контур не касается первого прямого пути) и второй с передачей $\underline{\Pi}_2 = \underline{H}'_{21}\underline{H}''_{11}\underline{H}'_{12}$ и определителем $\underline{\Delta}_2 = 1$ (нет несоприкасающихся контуров). Следовательно,

$$\underline{H}_{11} = (\underline{\Pi}_1\underline{\Delta}_1 + \underline{\Pi}_2\underline{\Delta}_2)/\underline{\Delta}.$$

Аналогично определяются элементы $\underline{H}_{12}$, $\underline{H}_{21}$, $\underline{H}_{22}$.

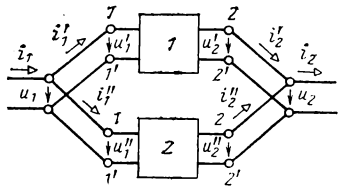


Рис. 4.41

Топологическую формулу можно применить и при вычислении коэффициентов матрицы $\underline{A}$ и других матриц четырехполюсника. Элементы матрицы $\underline{H}$ можно найти и путем устранения из графа рис. 4.40, *г* промежуточных узлов $\underline{U}_{12}$ и $\underline{I}_{12}$.

Четырехполюсники могут соединяться не только в каскад, но и параллельно (рис. 4.41, соединены соответственно выводы *1* и *1'* и *1'*, *2* и *2*, *2'* и *2'* обоих четырехполюсников), последовательно (соединены соответственно выводы *1'* — первого и *1* — второго, *2'* — первого и *2* — второго), последовательно-параллельно (первичные выводы соединены как при последовательном, а вторичные — как при параллельном соединении) и параллельно-последовательно. Для определения параметров или коэффициентов соединения целесообразно пользоваться матричным исчислением, выбирая уравнения четырехполюсника в наиболее удобной форме.

При этих соединениях четырехполюсников необходимо следить, чтобы не нарушалось равенство токов на выводах *1* и *1'* первого четырехполюсника, на выводах *2* и *2'* первого четырехполюсника и аналогично у второго (регулярность соединения).

Пример. Два четырехполюсника соединены параллельно (рис. 4.41). Выполняются равенства

$$\underline{U}_1 = \underline{U}'_1 = \underline{U}''_1; \quad \underline{I}_1 = \underline{I}'_1 + \underline{I}''_1;$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}'_2 = \underline{U}''_2; \quad \underline{I}_2 = \underline{I}'_2 + \underline{I}''_2.$$

Наиболее удобна форма записи уравнений с проводимостями. Для составляющих четырехполюсников

$$\|\underline{I}'\| = \|\underline{Y}'\| \cdot \|\underline{U}'\| \text{ и } \|\underline{I}''\| = \|\underline{Y}''\| \cdot \|\underline{U}''\|,$$

где

$$\|\underline{I}'\| = \left\| \begin{matrix} \underline{I}'_1 \\ \underline{I}'_2 \end{matrix} \right\|; \quad \|\underline{U}'\| = \left\| \begin{matrix} \underline{U}'_1 \\ \underline{U}'_2 \end{matrix} \right\|;$$

$$\|\underline{Y}'\| = \left\| \begin{matrix} \underline{Y}'_{11} & \underline{Y}'_{12} \\ \underline{Y}'_{21} & \underline{Y}'_{22} \end{matrix} \right\|$$

и аналогично для второго.

Для нового четырехполюсника

$$\|\underline{I}\| = \|\underline{Y}\| \cdot \|\underline{U}\|,$$

где

$$\|\underline{I}\| = \left\| \begin{matrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{matrix} \right\|; \quad \|\underline{U}\| = \left\| \begin{matrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{matrix} \right\|;$$

$$\|\underline{Y}\| = \left\| \begin{matrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{matrix} \right\|.$$

Но $\|\underline{I}\| = \|\underline{I}'\| + \|\underline{I}''\|$, или $\|\underline{I}\| = \|\underline{Y}'\| \cdot \|\underline{U}'\| + \|\underline{Y}''\| \cdot \|\underline{U}''\| = \|\underline{Y}' + \underline{Y}''\| \cdot \|\underline{U}\|$, так как $\|\underline{U}\| = \|\underline{U}'\| = \|\underline{U}''\|$.

Следовательно, $\|\underline{Y}\| = \|\underline{Y}'\| + \|\underline{Y}''\|$ и по правилу сложения митриц $\underline{Y}_{11} = \underline{Y}'_{11} + \underline{Y}''_{11}$; $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}'_{12} + \underline{Y}''_{12}$ и т. д.

При расчете коэффициентов четырехполюсника, эквивалентного регулярному соединению, можно объединять графы с соблюдением правила: сток — напряжение и (или) сток — ток одного объединяются соответственно с истоком — напряжением и (или) истоком — током другого для образования связи, которая получается при соединении четырехполюсников.

Активные четырехполюсники

Для активных четырехполюсников с зависимыми источниками (неавтономных) справедливы уравнения (1)—(5), связывающие напряжения и токи на первичных и вторичных выводах, и их матричная запись.

Связь коэффициентов различных типов уравнений по-прежнему задается табл. 4.6, но все четыре коэффициента каждого типа уравнений независимы, т. е. уравнения связи не выполняются ($\Delta_A \neq 1$; $\underline{Y}_{12} \neq -\underline{Y}_{21}$; $\underline{Z}_{12} \neq -\underline{Z}_{21}$; $\underline{H}_{21} \neq \underline{H}_{12}$; $\underline{G}_{21} \neq \underline{G}_{12}$).

Линия с потерями

Первичные параметры однородной линии: r_0 (Ом/км), L_0 (Гн/км), g_0 (См/км), C_0 (Ф/км) — резистивное сопротивление, индуктивность, резистивная проводимость и емкость на 1 км длины (можно задавать и на любую другую единицу длины).

Вторичные параметры — волновое (характеристическое) сопротивление и коэффициент распространения:

$$\underline{Z}_в = z_в \angle \theta = \sqrt{\underline{Z}_0 / \underline{Y}_0};$$

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0},$$

где $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$; $\underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0$; α — коэффициент ослабления, Нп/км; β — коэффициент фазы, рад/км.

Определение постоянных линий по опытам холостого хода и короткого замыкания

Если в начале линии длиной l измерить напряжение и ток при холостом ходе (разомкнуты выводы в конце линии) U_{1x} и I_{1x}, при коротком замыкании $U_{1к}$ и $I_{1к}$, а также углы сдвига фаз $\angle \underline{U}_{1x}$, $\underline{I}_{1x}$ и $\angle \underline{U}_{1к}$, $\underline{I}_{1к}$, то можно вычислить все параметры линии:

$$\underline{Z}_x = \underline{U}_{1x} / \underline{I}_{1x}; \quad \underline{Z}_к = \underline{U}_{1к} / \underline{I}_{1к};$$

$$\underline{Z}_в = \sqrt{\underline{Z}_x \underline{Z}_к} = r_в + j x_в = z_в \angle \theta;$$

$$\operatorname{th} \underline{\gamma} l = \operatorname{th} (\alpha + j\beta) l = \sqrt{\underline{Z}_к / \underline{Z}_x};$$

$$r_0 = \alpha r_в - \beta x_в; \quad x_0 = \omega L_0 = \beta r_в + \alpha x_в;$$

$$g_0 = \frac{\alpha r_в + \beta x_в}{z_в^2}; \quad b_0 = \omega C_0 = \frac{\beta r_в - \alpha x_в}{z_в^2}.$$

О вычислении αl и βl по найденному значению $\operatorname{th}\underline{\gamma} l$ — см. «Пассивные симметричные четырехполюсники».

Если заданы (известны) напряжение $\underline{U}_2$ и ток $\underline{I}_2$ в конце линии, то напряжение и ток в любом поперечном сечении (точке) линии

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \operatorname{ch}\underline{\gamma} x + \underline{I}_2 \underline{Z}_в \operatorname{sh}\underline{\gamma} x;$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_в} \operatorname{sh}\underline{\gamma} x + \underline{I}_2 \operatorname{ch}\underline{\gamma} x,$$

где x — расстояние от конца линии до данной точки.

Последние уравнения могут быть записаны иначе, если заменить гиперболические функции показательными:

$$\underline{U} = \underline{D}_1 e^{\underline{\gamma} x} + \underline{D}_2 e^{-\underline{\gamma} x} = \underline{U}_{пад} + \underline{U}_{отр};$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{D}_1}{\underline{Z}_в} e^{\underline{\gamma} x} - \frac{\underline{D}_2}{\underline{Z}_в} e^{-\underline{\gamma} x} = \underline{I}_{пад} - \underline{I}_{отр},$$

где

$$\underline{D}_1 = \frac{\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_в}{2}; \quad \underline{D}_2 = \frac{\underline{U}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_в}{2},$$

т. е. напряжение и ток в каждой точке можно представить как сумму падающей и отраженной волн, а волновое сопротивление

$$\underline{Z}_в = \underline{U}_{пад}/\underline{I}_{пад} = \underline{U}_{отр}/\underline{I}_{отр}.$$

Фазовая скорость волны

$$c = \omega/\beta = \lambda/T = \lambda f,$$

где λ — длина волны; f — частота тока; T — период.

При сопротивлении нагрузки $\underline{Z}_н$ коэффициент отражения

$$\underline{\rho} = \frac{\underline{D}_2}{\underline{D}_1} = \frac{\underline{U}_{2отр}}{\underline{U}_{2пад}} = \frac{\underline{I}_{2отр}}{\underline{I}_{2пад}} = \frac{\underline{Z}_н - \underline{Z}_в}{\underline{Z}_н + \underline{Z}_в}.$$

При согласованной нагрузке $\underline{Z}_н = \underline{Z}_в$ отраженной волны нет:

$$\underline{U} = \underline{U}_2 e^{\underline{\gamma} x} \quad \underline{I} = \underline{I}_2 e^{\underline{\gamma} x} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_в} e^{\underline{\gamma} x};$$

КПД линии

$$\eta = P_2/P_1 = (U_2 I_2 \cos\theta)/(U_1 I_1 \cos\theta) = e^{-2\alpha l};$$

входное сопротивление $\underline{Z}_{вх} = \underline{U}_1/\underline{I}_1 = \underline{Z}_в$.

При произвольной нагрузке входное сопротивление линии

$$\underline{Z}_{вх} = \underline{Z}_в \frac{\underline{Z}_н + \underline{Z}_в \operatorname{th}\underline{\gamma} l}{\underline{Z}_в + \underline{Z}_н \operatorname{th}\underline{\gamma} l} = \underline{Z}_в \frac{1 + \underline{\rho} e^{-2\underline{\gamma} l}}{1 - \underline{\rho} e^{-2\underline{\gamma} l}},$$

где l — длина линии.

Если линия состоит из двух участков с различными параметрами, то сначала нужно вычислить входное сопротивление второго участка. Входное сопротивление всей линии рассчитывается как входное сопротивление первого участка с сопротивлением нагрузки, равным входному сопротивлению второго участка. Аналогично рассчитывается входное сопротивление линии, состоящей из нескольких участков.

Схемы замещения линии даны в табл. 4.8.

Упрощенные формулы

Элементы схемы замещения можно выразить через $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$, $\underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0$ и длину линии l.

Для Т-образной схемы

$$\underline{Z}_1/2 = \underline{Z}_0 \, l\underline{H}_1; \quad \underline{Y}_2 = 1/\underline{Z}_2 = \underline{Y}_0 \, l\underline{H}_2.$$

Для П-образной схемы

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_0 \, l\underline{H}_2; \quad \underline{Y}_2/2 = 1/2\underline{Z}_2 = \underline{Y}_0 \, l\underline{H}_1.$$

Для Х-образной схемы

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_0 \, l\underline{H}_1; \quad \underline{Y}_2 = \underline{Y}_0 \, l\underline{H}_1.$$

Здесь

$$\underline{H}_1 = \left(\operatorname{th}\frac{\underline{\gamma} l}{2}\right)/\underline{\gamma} l = \frac{1}{2} - \frac{(\underline{\gamma} l)^2}{24} + \frac{(\underline{\gamma} l)^4}{240} - \frac{(\underline{\gamma} l)^6}{2370} + \ldots;$$

$$\underline{H}_2 = \frac{\operatorname{sh}\underline{\gamma} l}{\underline{\gamma} l} = 1 + \frac{(\underline{\gamma} l)^2}{3!} + \frac{(\underline{\gamma} l)^4}{5!} + \frac{(\underline{\gamma} l)^6}{7!} + \ldots$$

Легко оценить ошибку при приближенном расчете, когда отбрасываются члены ряда, начиная с выбранной наивысшей степени $\underline{\gamma} l$.

Упрощенные формулы применяются и при расчете режима линии.

Если в уравнениях длинной линии $\operatorname{sh}\underline{\gamma} l$ и $\operatorname{ch}\underline{\gamma} l$ заменить соответствующими рядами, ограничиваясь первыми двумя членами, что допустимо, когда третий член разложения мал, то

$$\operatorname{sh}\underline{\gamma} l \approx \underline{\gamma} l + \frac{(\underline{\gamma} l)^3}{3!}; \qquad \operatorname{ch}\underline{\gamma} l \approx 1 + \frac{(\underline{\gamma} l)^2}{2!};$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 \, l\underline{Y}_0 \, l}{2}\right) + \underline{I}_2 \underline{Z}_0 \, l \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 \, l\underline{Y}_0 \, l}{6}\right);$$

$$\underline{I}_1 = \underline{U}_2 \underline{Y}_0 \, l \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 \, l\underline{Y}_0 \, l}{6}\right) + \underline{I}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 \, l\underline{Y}_0 \, l}{2}\right).$$

При $f = 50$ Гц и $l < 200$ км эти формулы дают погрешность менее 2 %.

Примечания: 1. Для однородной линии справедливы все расчетные формулы симметричного четырехполюсника, если в них положить $\underline{\Gamma} = \underline{\gamma} l$.

2. Все формулы применимы к трехфазным симметричным линиям, причем $\underline{U}$, $\underline{I}$ — фазные напряжение и ток; r_0, L_0, g_0, C_0 — параметры на одну фазу.

Линия с малыми потерями

Если $\omega L_0/r_0 > 5$ и $\omega C_0/g_0 > 5$, то для расчета вторичных параметров можно пользоваться приближенными формулами:

$$\underline{Z}_в = \sqrt{L_0/C_0}; \quad \beta = \omega\sqrt{L_0 C_0};$$

$$\alpha = \frac{r_0}{2}\sqrt{C_0/L_0} + \frac{g_0}{2}\sqrt{L_0/C_0}.$$

Линия без потерь

Если можно считать $r_0 \approx 0$; $g_0 \approx 0$ (т. е. $r_0/\omega L_0 \ll 1$; $g_0/\omega C_0 \ll 1$), то $\alpha = 0$; $\underline{\gamma} = j\beta$; $\beta = 2\pi/\lambda = \omega\sqrt{L_0 C_0}$; $\underline{Z}_в = z_в = \sqrt{L_0/C_0}$; $c = \omega/\beta = 1/\sqrt{L_0 C_0} = 1/\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0}$, где ε_r и μ_r — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды между проводами линии:

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cos\beta x + j\underline{I}_2 z_в \sin\beta x;$$

$$\underline{I} = j\frac{\underline{U}_2}{z_в}\sin\beta x + \underline{I}_2 \cos\beta x;$$

$$\underline{Z}_{вх} = z_в \frac{\underline{Z}_н + jz_в \operatorname{tg}\beta l}{z_в + j\underline{Z}_н \operatorname{tg}\beta l} = z_в \frac{1 + \underline{\rho} e^{-j2\beta l}}{1 - \underline{\rho} e^{-j2\beta l}}.$$

При чисто реактивной нагрузке, т. е. $\underline{Z}_н = jx_н$, при коротком замыкании $\underline{Z}_н = 0$ и холостом ходе $\underline{Z}_н = \infty$ в линии образуются стоячие волны, а входное сопротивление получается чисто реактивным. При $\underline{Z}_н = 0$ получается $\underline{Z}_к = jz_в \operatorname{tg}\beta l$; при $\underline{Z}_н = \infty$ получается $\underline{Z}_х = -jz_в \operatorname{ctg}\beta l$.

При согласованной нагрузке $\underline{Z}_н = r_н = z_в$ устанавливается режим бегущей волны:

$$\underline{U} = \underline{U}_2 e^{j\beta x}; \quad \underline{I} = \underline{I}_2 e^{j\beta x} = \frac{\underline{U}_2}{z_в} e^{j\beta x}.$$

Степень рассогласования нагрузки оценивается коэффициентом бегущей волны

$$k_б = \frac{U_{min}}{U_{max}} = \frac{U_{2пад} - U_{2отр}}{U_{2пад} + U_{2отр}} = \frac{1 - |\underline{\rho}|}{1 + |\underline{\rho}|}$$

или коэффициентом стоячей волны $k_с = 1/k_б$. Здесь U_{min}, U_{max} — минимальное и максимальное значения напряжения (между ближайшими точками, в которых наблюдаются U_{min} и U_{max}, расстояние равно $\lambda/4$).

Переходные процессы в цепях с распределенными параметрами

Волны в линии возникают в результате различных коммутаций (подключение или отключение источников питания, приемников и т. д.) и под действием атмосферных явлений.

При подключении к линии источника ЭДС в линии возникает волна с напряжением той же формы, что и ЭДС.

При подключении к линии без потерь источника, внутренним сопротивлением которого нельзя пренебречь, а также при наличии нагрузки на входе линии форма возникающей волны может отличаться от формы ЭДС источника. Напряжение $u_{пад}$ и ток $i_{пад}$ возникающей волны определяются по схеме замещения, на которой линия представлена своим волновым сопротивлением $z_в$.

Пример. Источник E, $r_{вт}$, L подключается к линии без потерь ($z_в$), на входных выводах 1—$1'$ который есть и приемник с сопротивлением r (рис. 4.42, *а*).

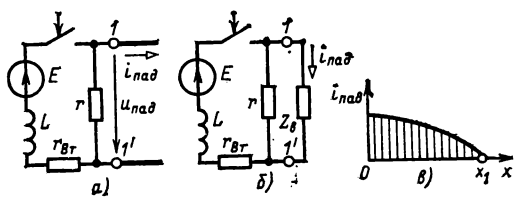


Рис. 4.42

Для определения $u_{пад}$, $i_{пад}$ составлена схема замещения (рис. 4.42, *б*). Рассчитав переходный процесс в этой схеме любым из известных методов, можно найти ток $i_{пад}$ и напряжение $u_{пад} = z_в i_{пад}$. Например, при $r = z_в = 2r_{вт} = R$ ток (время отсчитывается от момента мгновенного замыкания рубильника)

$$i_{пад} = \frac{E}{2R}(1 - e^{-\delta t}),$$

где $\delta = R/L$.

На рис. 4.42, *в* показан график распределения тока вдоль линии в момент t_1, когда волна прошла путь $x_1 = ct_1$.

Для воздушных линий (без потерь) скорость волны $c = c_0 = 3 \cdot 10^5$ км/с, для кабелей $c = c_0/\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$.

При движении волны по однородной линии без потерь форма волны не изменяется. Когда волна достигает конца линии, возникает новая (отраженная) волна, форма которой зависит и от характера нагрузки в конце линии. Если волна достигает места соединения двух линий, то возникают две новые волны: отраженная и проходящая во вторую линию.

Напряжения и токи отраженной и проходящей волн можно определить по схеме замещения.

На рис. 4.43, *б* дана схема замещения для общего случая отражения волны в месте соединения двух линий (рис. 4.43, *а*), когда в месте соединения включены еще элементы с сосредо-

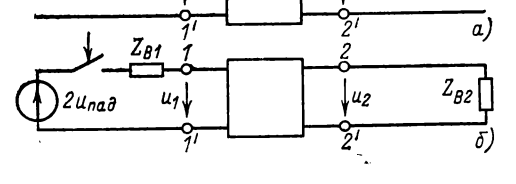
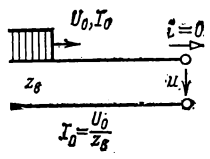
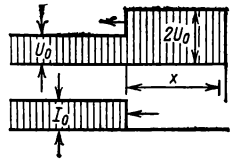
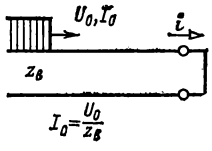
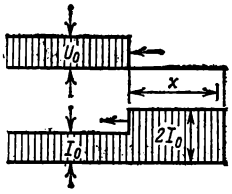
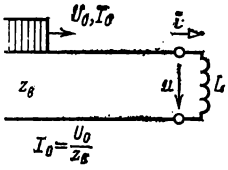
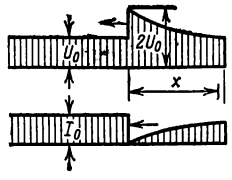
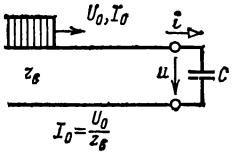
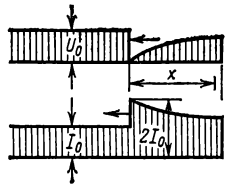
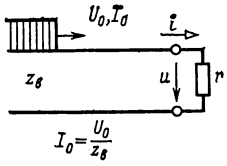
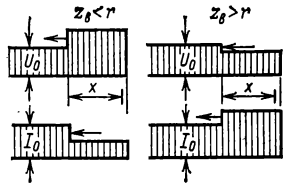


Рис. 4.43

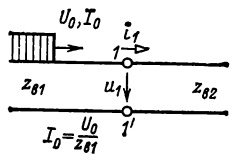
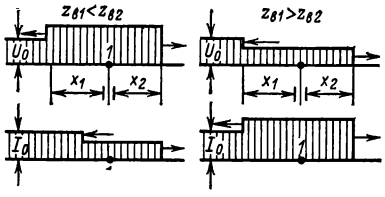
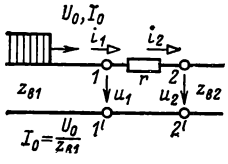
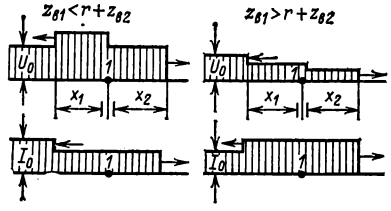
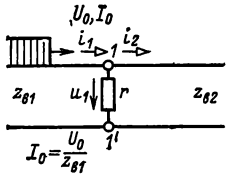
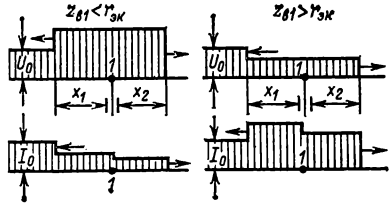
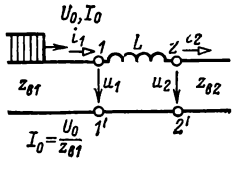
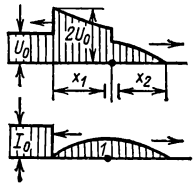
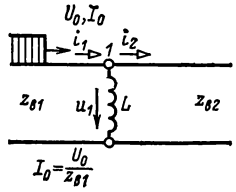
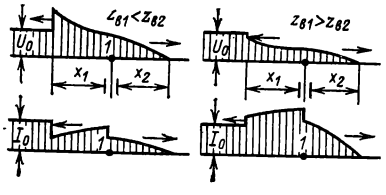
Таблица 4.10. **Отражение волны прямоугольной формы от конца линии**

Нагрузка в конце линии	Распределение напряжения и тока	Законы изменения напряжения и тока в конце линии
		$u = 2U_0$ $i = 0$
		$u = 0;$ $i = 2I_0$
		$u = 2U_0 e^{pt};\ p = -\frac{z_в}{L};$ $i = 2I_0 (1 - e^{pt})$
		$u = 2U_0 (1 - e^{pt});$ $i = 2I_0 e^{pt};\ p = -\frac{1}{z_в C}$
		$u = \frac{2U_0 r}{z_в + r};\ i = \frac{2I_0 z_в}{z_в + r}$

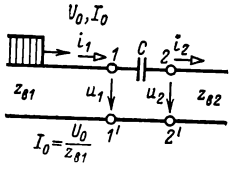
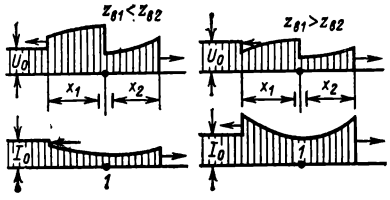
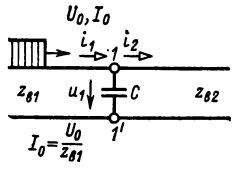
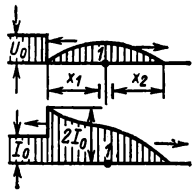
Примечания: 1. Время t отсчитывается от момента, когда падающая волна (U_0, I_0) достигает конца линии (первое отражение). Предполагается, что за время t следующие отражения еще не наступили.

2. Чтобы получить законы распределения напряжения и тока вдоль линии, когда волна, отразившись от конца линии, прошла путь x, нужно в выражениях для u и i заменить t на $t-x/c$, где c — скорость движения волны.

Таблица 4.11. **Падение волны прямоугольной формы на узел соединения двух линий**

Схема соединения линий	Распределение напряжений и линий	Закон изменения напряжений и токов в месте соединения линий
		$u_1 = \frac{2U_0 z_{в2}}{z_{в1} + z_{в2}}$; $i_1 = \frac{2I_0 z_{в1}}{z_{в1} + z_{в2}}$
		$u_1 = \frac{2U_0 (r + z_{в2})}{z_{в1} + r + z_{в2}}$; $u_2 = \frac{2U_0 z_{в2}}{z_{в1} + r + z_{в2}}$; $i_1 = i_2 = \frac{2I_0 z_{в1}}{z_{в1} + r + z_{в2}}$
		$u_1 = u_2 = \frac{2U_0 r_{эк}}{z_{в1} + r_{эк}}$; $i_1 = \frac{2I_0 z_{в1}}{z_{в1} + z_{эк}}$; $i_2 = \frac{2I_0 r_{эк}}{z_{в1} + r_{эк}} \frac{z_{в1}}{z_{в2}}$; $r_{эк} = \frac{r z_{в2}}{r + z_{в2}}$
		$u_1 = \frac{2U_0}{z_{в1} + z_{в2}} (z_{в2} + z_{в1} e^{pt})$; $u_2 = \frac{2U_0 z_{в2}}{z_{в1} + z_{в2}} (1 - e^{pt})$; $i_1 = i_2 = \frac{2I_0 z_{в1}}{z_{в1} + z_{в2}} (1 - e^{pt})$; $p = -\frac{z_{в1} + z_{в2}}{L}$
		$u_1 = u_2 = \frac{2U_0 z_{в2}}{z_{в1} + z_{в2}} e^{pt}$; $i_1 = 2I_0 \left(1 - \frac{z_{в2}}{z_{в1} + z_{в2}} e^{pt}\right)$; $i_2 = \frac{2I_0 z_{в1}}{z_{в1} + z_{в2}} e^{pt}$; $p = -\frac{r_{эк}}{L}$; $r_{эк} = \frac{z_{в1} z_{в2}}{z_{в1} + z_{в2}}$

Продолжение табл. 4.11

Схема соединения линий	Распределение напряжений и токов	Закон изменения напряжений и токов в месте соединения линий
		$= 2U_0 - \frac{2U_0 z_{в1}}{z_{в1}+z_{в2}} e^{pt}$; $u_2 = \frac{2U_0 z_{в2}}{z_{в1}+z_{в2}} e^{pt}$; $i_1 = i_2 = \frac{2I_0 z_{в1}}{z_{в1}+z_{в2}} e^{pt}$; $p = -\frac{1}{(z_{в1}+z_{в2})C}$
		$u_1 = u_2 = \frac{2U_0 z_{в2}}{z_{в1}+z_{в2}}(1-e^{pt})$; $i_1 = \frac{2I_0}{z_{в1}+z_{в2}}(z_{в1}+z_{в2}e^{pt})$; $i_2 = \frac{2I_0 z_{в1}}{z_{в1}+z_{в2}}(1-e^{pt})$; $p = -\frac{1}{r_{эк}C}$; $r_{эк} = \frac{z_{в1}z_{в2}}{z_{в1}+z_{в2}}$

Примечания: 1. Время t отсчитывается от момента, когда падающая волна (U_0, I_0) достигает места соединения линий. Предполагается, что за время t следующие отражения волн еще не наступили.

2. Чтобы получить законы распределения тока и напряжения вдоль линии, когда отраженная волна прошла путь x_1, а проходящая — путь x_2, нужно в выражениях для u_1 и i_1 заменить x_1 на $t-x_1/c_1$ и в выражениях для u_2 и i_2 заменить t на $t-x_2/c_2$, где c_1 и c_2 — скорости движения волн в первой и второй линиях.

точенными параметрами, составляющие произвольный пассивный четырехполюсник. На рис. 4.43, *а*: $u_{пад}$ — напряжение падающей волны; $z_{в1}$ и $z_{в2}$ — волновые сопротивления первой и второй линий. Если отражение происходит от конца линии (вторая линия отсутствует), то в схеме замещения отсутствует сопротивление $z_{в2}$ и четырехполюсник следует рассматривать относительно его первичных выводов как двухполюсник. По схеме замещения определяются напряжения и токи на выводах *1—1′* и *2—2′* четырехполюсника: u_1, i_1, u_2, i_2. Напряжение и ток отраженной волны: $u_{отр}=u_1-u_{пад}$; $i_{отр}=-i_{пад}-i_1$, где $i_{пад}=u_{пад}/z_{в1}$; $i_{отр}=u_{отр}/z_{в1}$.

Напряжение и ток проходящей волны: $u_{прох}=u_2$; $i_{прох}=i_2=u_{прох}/z_{в2}$.

Отсчет времени ($t=0$) можно начать с момента, когда волна $u_{пад}$, движущаяся со скоростью c, достигнет места соединения линий (или конца линии).

Пример. Волна с прямоугольным фронтом $u_{пад}=U_0=100$ В движется по воздушной линии $z_{в1}=400$ Ом (рис. 4.44, *а*). В месте соединения линии с кабелем ($z_{в2}=50$ Ом; $\varepsilon_r=4$; $\mu_r=1$) включены конденсатор $C=50$ мкФ и резистор $r=50$ Ом. Найти $u_{отр}$, $i_{отр}$, $u_{прох}$, $i_{прох}$. Построить график распределения напряжения и тока вдоль обеих линий, когда отраженная от места соединения линий волна пройдет x км в направлении к началу воздушной линии.

Напряжения и токи в схеме замещения (рис. 4.44, *б*) можно найти, например, классическим методом:

$$u_2 = u_{2у} + u_{2св};\quad u_{2у} = \frac{2U_0 z_{в2}}{z_{в1}+r+z_{в2}} = 20 \text{ В};$$

$$u_{2св} = Ae^{p_1 t},$$

где $p_1 = -1/r_{эк}C = -250$ с$^{-1}$;

$$r_{эк} = \frac{(r+z_{в2})z_{в1}}{r+z_{в2}+z_{в1}} = 80 \text{ Ом, т. е. } u_2 = 20 + Ae^{-250t} \text{ В}.$$

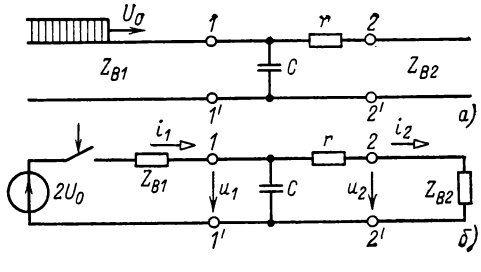


Рис. 4.44

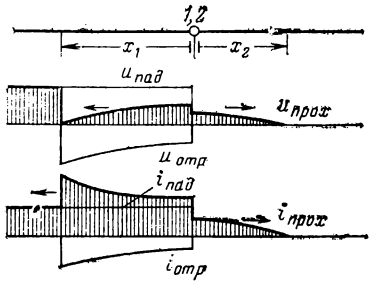


Рис. 4.45

При $t=0$ и $u_1=0$, следовательно, $u_2=0$ и $0=20+A$, откуда $A=-20$ В, т. е.

$$u_2 = 20 - 20e^{-250t} \text{ В}.$$

Далее

$$i_2 = u_2/z_{в2} = 0{,}4 - 0{,}4e^{-250t} \text{ А};$$

$$u_1 = (r + z_{в2})\, i_2 = 40 - 40e^{-250t} \text{ Б};$$

$$i_1 = (2U_0 - u_1)/z_{в1} = 0{,}4 + 0{,}1\, e^{-250t} \text{ А};$$

$$u_{отр} = u_1 - u_{пад} = -60 - 40e^{-250t} \text{ В};$$

$$i_{отр} = u_{отр}/z_{в1} = -0{,}15 - 0{,}1e^{-250t} \text{ А};$$

$$u_{прох} = u_2;\quad i_{прох} = i_2.$$

Чтобы построить распределение напряжений и токов отраженной и прходящей волн вдоль линий (рис. 4.45), нужно в выражениях для $u_{отр}$, $i_{отр}$ и u_2, i_2 заменить t на $t-x/c$, где x — путь, пройденный волной за время t (по 1-й линии со скоростью c_1 пройден путь x_1, по 2-й линии со скоростью c_2 — путь x_2).

Графики напряжений и токов в различных случаях отражения даны в табл. 4.10 и 4.11.

При повторных отражениях необходимо применять принцип наложения.

Если переходный процесс возникает в результате не включения линии, а другой коммутации, например подключения приемника к линии, находящейся под напряжением, расчет по схеме замещения должен быть сведен к нулевым начальным условиям, как и в цепях с сосредоточенными параметрами.

Литература [4.1—4.10, 4.14, 4.15, 4.17—4.24, 4.41—4.49].

4.6. НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ЦЕПИ

Компонентные уравнения

Схема нелинейной резистивной цепи содержит линейные и нелинейные резистивные двухполюсники, линейные зависимые и независимые источники ЭДС и тока.

Все множество ветвей схемы делится на два подмножества: g-ветви и r-ветви, которые являются частными случаями обобщенных y- и z-ветвей (см. «Расширенные узловые уравнения»).

Источники тока (зависимые и независимые), разомкнутые ветви, нелинейные резисторы с однозначной характеристикой $i(u)$ являются g-ветвями. Источники ЭДС (зависимые и независимые), короткозамкнутые ветви, нелинейные резисторы с однозначной характеристикой $u(i)$ являются r-ветвями. Резисторы, у которых однозначны обе зависимости, могут быть произвольно отнесены к g- или r-ветвям. Компонентные уравнения для мгновенных значений величин

$$\mathbf{i}' = \mathbf{i}'(\mathbf{u}'), \quad \mathbf{u}'' = \mathbf{u}''(\mathbf{i}''),$$

где $\mathbf{i}'$ и $\mathbf{u}'$ — векторы (матрицы-столбцы) токов и напряжений g-ветвей; $\mathbf{i}''$ и $\mathbf{u}''$ — векторы токов и напряжений r-ветвей. Эти уравнения можно представить в виде двух пар уравнений: для линейных ветвей

$$\mathbf{i}'_л = \mathbf{G}\mathbf{u}'_л + \mathbf{K}_{21}\,\mathbf{i}'_л - \mathbf{J};$$

$$\mathbf{u}''_л = \mathbf{R}\mathbf{i}''_л + \mathbf{N}_{21}\,\mathbf{u}'_л - \mathbf{E},$$

для нелинейных ветвей

$$\mathbf{i}'_н = \mathbf{i}'_н(\mathbf{u}'_н); \quad \mathbf{u}''_н = \mathbf{u}''_н(\mathbf{i}''_н),$$

где индексы «л» и «н» у векторов токов и напряжений относятся соответственно к линейным и нелинейным ветвям; $\mathbf{G}$ — матрица проводимостей; $\mathbf{K}_{21}$ — матрица параметров ИТУТ; $\mathbf{J}$ — вектор токов независимых источников тока; $\mathbf{R}$ — матрица сопротивлений; $\mathbf{N}_{21}$ — матрица параметров ИНУН; $\mathbf{E}$ — вектор ЭДС независимых источников ЭДС

В матрице $\mathbf{G}$ элементы главной диагонали соответствуют проводимостям линейных g-ветвей, недиагональные элементы — параметры ИТУН. В матрице $\mathbf{R}$ элементы главной диагонали соответствуют сопротивлениям линейных r-ветвей, недиагональные элементы — параметрам ИНУТ.

Параметры независимых источников тока и ЭДС могут быть постоянными или зависящими от времени. В последнем случае матричные уравнения описывают режим в соответствующий момент времени.

Топологические уравнения

Дополнительно по 1-му и 2-му законам Кирхгофа (см. «Применение законов Кирхгофа»)

$$\mathbf{A}\mathbf{i} = 0; \quad \mathbf{B}\mathbf{u} = 0,$$

или при разделении ветвей на два подмножества

$$\mathbf{A}_1\,\mathbf{i}' + \mathbf{A}_2\,\mathbf{i}'' = 0; \quad \mathbf{B}_1\,\mathbf{u}' + \mathbf{B}_2\,\mathbf{u}'' = 0,$$

где индексы 1 и 2 у подматриц относят соответственно к g- и r-ветвям.

В свою очередь, каждая из подматриц может быть разделена на две подматрицы, соответствующие линейным и нелинейным ветвям

$$\mathbf{A}_{1л}\,\mathbf{i}'_л + \mathbf{A}_{1н}\,\mathbf{i}'_н + \mathbf{A}_{2л}\,\mathbf{i}''_л + \mathbf{A}_{2н}\,\mathbf{i}''_н = 0;$$

$$\mathbf{B}_{1л}\,\mathbf{u}'_л + \mathbf{B}_{1н}\,\mathbf{u}'_н + \mathbf{B}_{2л}\,\mathbf{u}''_л + \mathbf{B}_{2н}\,\mathbf{u}''_н = 0.$$

При расчете цепей в качестве переменных могут быть выбраны узловые потенциалы или контурные токи (см. «Метод контурных токов» и «Метод узловых потенциалов»):

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}^{\mathrm{т}}\,\boldsymbol{\varphi}; \quad \mathbf{i} = \mathbf{B}^{\mathrm{т}}\,\mathbf{i}^{(к)},$$

т. е. соответственно

$$\mathbf{u}' = \mathbf{A}^{\mathrm{т}}\,\boldsymbol{\varphi}; \quad \mathbf{u}'' = \mathbf{A}_2^{\mathrm{т}}\,\boldsymbol{\varphi}; \quad \mathbf{i}' = \mathbf{B}_1^{\mathrm{т}}\,\mathbf{i}^{(к)};$$

$$\mathbf{i}'' = \mathbf{B}_2^{\mathrm{т}}\,\mathbf{i}^{(к)}.$$

Каждое из последних соотношений, в свою очередь, может быть представлено в виде двух

$$\mathbf{u}_{\text{л}}^{j} = \mathbf{A}_{j\text{л}}^{\text{т}}\varphi;\ \mathbf{u}_{\text{н}}^{j} = \mathbf{A}_{j\text{н}}^{\text{т}}\varphi;\ \mathbf{i}_{\text{л}}^{j} = \mathbf{B}_{j\text{л}}^{\text{т}}\mathbf{i}^{(\text{к})};$$

$$\mathbf{i}_{\text{н}}^{j} = \mathbf{B}_{j\text{н}}^{\text{т}}\mathbf{i}^{(\text{к})},$$

где $j = 1, 2$.

Узловые, контурные и расширенные узловые уравнения

Уравнения с узловыми потенциалами могут быть составлены при условии, что ветви схемы являются g-ветвями. В этом случае компонентные уравнения схемы:

$$\mathbf{i}_{\text{л}} = \mathbf{G}\mathbf{u}_{\text{л}} - \mathbf{J};\ \mathbf{i}_{\text{н}} = \mathbf{i}_{\text{н}}(\mathbf{u}_{\text{н}});\ \mathbf{A}_{\text{л}}\mathbf{i}_{\text{л}} + \mathbf{A}_{\text{н}}\mathbf{i}_{\text{н}} = 0$$

и матричное уравнение с узловыми потенциалами

$$\mathbf{A}_{\text{л}}\mathbf{G}\mathbf{A}_{\text{л}}^{\text{т}}\varphi + \mathbf{A}_{\text{н}}\mathbf{i}_{\text{н}}\left(\mathbf{A}_{\text{н}}^{\text{т}}\varphi\right) = \mathbf{A}_{\text{л}}\mathbf{J}.$$

Уравнения с контурными токами могут быть составлены при условии, что все ветви схемы являются r-ветвями. В этом случае уравнения схемы

$$\mathbf{u}_{\text{л}} = \mathbf{R}\mathbf{i}_{\text{л}} - \mathbf{E};\ \mathbf{u}_{\text{н}} = \mathbf{u}_{\text{н}}(\mathbf{i}_{\text{н}});$$

$$\mathbf{B}_{\text{л}}\mathbf{u}_{\text{л}} + \mathbf{B}_{\text{н}}\mathbf{u}_{\text{н}} = 0$$

и матричное уравнение с контурными токами

$$\mathbf{B}_{\text{л}}\mathbf{R}\mathbf{B}_{\text{л}}^{\text{т}}\mathbf{i}^{(\text{к})} + \mathbf{B}_{\text{н}}\mathbf{u}_{\text{н}}\left(\mathbf{B}_{\text{н}}^{\text{т}}\mathbf{i}^{(\text{к})}\right) = \mathbf{B}_{\text{л}}\mathbf{E}.$$

Из рассмотренных уравнений наибольшее применение находит уравнение с узловыми потенциалами. В этом уравнении $\mathbf{G}^{(\text{у})} = \mathbf{A}_{\text{л}}\mathbf{G}\mathbf{A}_{\text{л}}^{\text{т}}$ — матрица узловых проводимостей схемы при разомкнутых нелинейных ветвях; эта матрица легко формируется на ЭВМ по логическим правилам без операций перемножения матриц. Слагаемые $\mathbf{A}_{\text{н}}\mathbf{i}_{\text{н}}$ и $\mathbf{A}_{\text{л}}\mathbf{J}$, учитывающие в уравнениях для узлов токи нелинейных резисторов и токи источников, и аргументы нелинейных зависимостей $\mathbf{u}_{\text{н}} = \mathbf{A}_{\text{н}}^{\text{т}}\varphi$ также можно записать, не прибегая к умножению матриц.

Пример. Для схемы по рис. 4.46, *а* с параметрами g_k, J_k $(k=1,2)$ линейных ветвей и зависимостями $i_k(u_k)$ $(k=3\div6)$ нелинейных ветвей составим уравнение с узловыми потенциалами.

Положительные направления токов и напряжений ветвей показаны на графе (рис. 4.46, *б*). Полагая $\varphi_4 = 0$, запишем матрицу соединений узловых проводимостей

$$\mathbf{A} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \end{Vmatrix},$$

откуда

$$\mathbf{A}_{\text{л}} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{Vmatrix},\quad \mathbf{A}_{\text{н}} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \end{Vmatrix}.$$

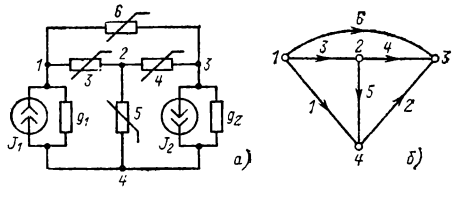


Рис. 4.46

Матрица **G** и вектор **J** соответственно равны

$$\mathbf{G} = \begin{Vmatrix} g_1 & 0 \\ 0 & g_2 \end{Vmatrix},\quad \mathbf{J} = \begin{Vmatrix} J_1 \\ J_2 \end{Vmatrix}.$$

Матрица узловых проводимостей и вектор узловых токов линейной части схемы:

$$\mathbf{A}_{\text{л}}\mathbf{G}\mathbf{A}_{\text{л}}^{\text{т}} = \begin{Vmatrix} g_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_2 \end{Vmatrix},\quad \mathbf{A}_{\text{л}}\mathbf{J}_{\text{л}} = \begin{Vmatrix} J_1 \\ 0 \\ -J_2 \end{Vmatrix}$$

Так как $\mathbf{i}_{\text{н}} = \begin{Vmatrix} i_3 i_4 i_5 i_6 \end{Vmatrix}^{\text{т}}$, то

$$\mathbf{A}_{\text{н}}\mathbf{i}_{\text{н}} = \begin{Vmatrix} i_3 + i_6 \\ -i_3 + i_4 + i_5 \\ -i_4 - i_6 \end{Vmatrix},$$

где $i_k = i_k(u_k)$.

Аргументы нелинейных зависимостей

$$u_{\text{н}} = \begin{Vmatrix} u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{Vmatrix} = \mathbf{A}_{\text{н}}^{\text{т}}\varphi = \mathbf{A}_{\text{н}}^{\text{т}}\begin{Vmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \varphi_1 - \varphi_2 \\ \varphi_2 - \varphi_3 \\ \varphi_2 \\ \varphi_1 - \varphi_3 \end{Vmatrix}.$$

Матричное уравнение с узловыми потенциалами

$$\begin{Vmatrix} g_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_2 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{Vmatrix} +$$

$$+ \begin{Vmatrix} i_3(\varphi_1 - \varphi_2) + i_6(\varphi_1 - \varphi_3) \\ -i_3(\varphi_1 - \varphi_2) + i_4(\varphi_2 - \varphi_3) + i_5(\varphi_2) \\ -i_4(\varphi_2 - \varphi_3) - i_6(\varphi_1 - \varphi_3) \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} J_1 \\ 0 \\ -J_2 \end{Vmatrix}.$$

В уравнениях узловых потенциалов предполагается, что все источники энергии представлены в виде источников тока, а в уравнениях контурных токов — в виде источников ЭДС.

Уравнения с узловыми потенциалами нельзя составить непосредственно, т. е. без преобразования схемы, если схема наряду с g-ветвями содержит r-ветви (ветви с нулевым сопротивлением, нелинейные резисторы с немонотонной вольт-амперной характеристикой). Но можно составить расширенное узловое уравнение. Переменными в этом уравнении служат узловые потенциалы, а также токи линейных и нелинейных r-ветвей (см. также «Расширенные узловые уравнения»).

Расширенное узловое уравнение может быть сформировано с помощью ЭВМ по логическим правилам. В частности, матрица $\mathbf{A}_{1\text{л}}\mathbf{G}\mathbf{A}_{1\text{л}}^{\text{т}}$ представляет собой матрицу узловых проводимостей, учитывающую только линейные g-ветви и может быть составлена без операций умножения. Последнее матричное уравнение не имеет ограничений на тип ветвей.

Пример. Составим расширенное узловое уравнение для схемы, приведенной на рис. 4.47, *а*, граф которой дан на рис. 4.47, *б*. Заданы токи источ-

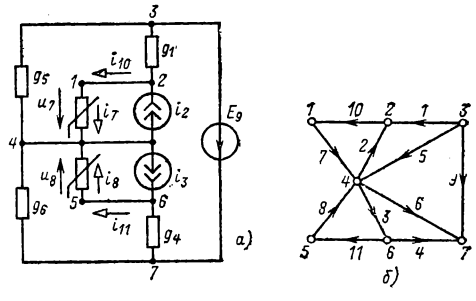


Рис. 4.47

ников (ИТУТ) $i_2=\alpha' i_{11}$, $i_3=\alpha'' i_{10}$ и нелинейные характеристики двухполюсников $i_7(u_7)=I_{70}(\exp ku_7-1)$, $i_8(u_8)=I_{80}(\exp ku_8-1)$.

Схема содержит три ветви с нулевым сопротивлением: ветвь *9* с источником ЭДС E_9 и управляющие ИТУТ ветви *10*, *11*; эти ветви будем считать *r*-ветвями, ветви *1*—*8* считаем *g*-ветвями. Поскольку в схеме нет линейных *r*-ветвей, то расширенное узловое уравнение

$$\begin{Vmatrix} \mathbf{A}_{1л}\mathbf{G}\mathbf{A}_{1л}^{T} & \mathbf{A}_{1л}K_{21}+\mathbf{A}_{2л} \\ \mathbf{N}_{21}\mathbf{A}_{1л}^{T}-\mathbf{A}_{2л} & \mathbf{R} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \varphi \\ \mathbf{i}_{2л} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} \mathbf{A}_{1н}\,\mathbf{i}_{н}'\left(\mathbf{A}_{1н}^{T}\varphi\right) \\ 0 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \mathbf{A}_{1л}\mathbf{J} \\ \mathbf{E} \end{Vmatrix},$$

где при $\varphi_7=0$

$$\mathbf{A}=\begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0\,0 & 0\,0 & 1 & 0\,0 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 0\,0 & 0\,0 & 0 & 0\,0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0\,0 & 1\,0 & 0 & 0\,1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1\,0 & -1\,1 & -1 & -1\,0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0\,0 & 0\,0 & 0 & 1\,0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1\,1 & 0\,0 & 0 & 0\,0 & 0 & 1 \end{Vmatrix},$$

откуда

$$\mathbf{A}_{1л}=\begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0\,0 & 0\,0 \\ -1 & -1 & 0\,0 & 0\,0 \\ 1 & 0 & 0\,0 & 1\,0 \\ 0 & 1 & 1\,0 & -1\,1 \\ 0 & 0 & 0\,0 & 0\,0 \\ 0 & 0 & -1\,1 & 0\,0 \end{Vmatrix};\quad \mathbf{A}_{1н}=\begin{Vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{Vmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{2л}=\begin{Vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}.$$

Матрицы параметров схемы:

$\mathbf{G}=\operatorname{diag}(g_1, 0, 0, g_4, g_5, g_6)$; $\mathbf{R}=\operatorname{diag}(0, 0, 0)$;

$$\mathbf{K}_{21}=\begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha' \\ 0 & \alpha'' & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix};\quad \mathbf{N}_{21}=0;\ \mathbf{J}=0;\ \mathbf{E}=\|E_9\ 0\ 0\|.$$

У матрицы $\mathbf{K}_{21}$ строки соответствуют линейным *g*-ветвям, а стобцы — линейным *r*-ветвям; матрица $\mathbf{N}_{21}=0$, поскольку схема не содержит ИНУН. Подставив соответствующие матрицы в расширенное узловое уравнение, получим

$$\begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & g_1 & -g_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -\alpha' \\ 0 & -g_1 & (g_1+g_5) & -g_5 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g_5 & (g_5+g_6) & 0 & 0 & \alpha'' & \alpha' \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_4 & -\alpha'' & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{Vmatrix} \times$$

$$\times \begin{Vmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \\ \varphi_5 \\ \varphi_6 \\ i_9 \\ i_{10} \\ i_{11} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} i_7(\varphi_1-\varphi_4) \\ 0 \\ 0 \\ -i_7(\varphi_1-\varphi_4)-i_8(\varphi_5-\varphi_4) \\ i_8(\varphi_5-\varphi_4) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_9 \\ 0 \\ 0 \end{Vmatrix},$$

где

$$i_7(\varphi_1-\varphi_4)=I_{70}[\exp k(\varphi_1-\varphi_4)-1];$$

$$i_8(\varphi_5-\varphi_4)=I_{80}[\exp k(\varphi_5-\varphi_4)-1].$$

Полученное уравнение может быть составлено и по логическим правилам.

Решение уравнений методом простой итерации

Нелинейные резистивные цепи описываются системой нелинейных алгебраических уравнений, для решения которых в общем случае применимы только численные методы. В отличие от линейных цепей уравнения нелинейных цепей могут не иметь решения или могут иметь несколько решений. При решении нелинейных уравнений методом простой итерации матричное уравнение цепи приводится к виду

$$\mathbf{X}=\mathbf{F}(\mathbf{X}),$$

где $\mathbf{X}=\|x_1, x_2, \ldots, x_n\|^{T}$—вектор искомых переменных;

$$\mathbf{F}(\mathbf{X})=\begin{Vmatrix} F_1(x_1, x_2, \ldots, x_n) \\ F_2(x_1, x_2, \ldots, x_n) \\ \cdots\cdots\cdots \\ F_n(x_1, x_2, \ldots, x_n) \end{Vmatrix}$$

— нелинейная векторная функция, *i*-м элементом которой служит нелинейная функция $F_i(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, $i=1, 2, \ldots, n$.

Вначале следует произвольно задаться нулевым (начальным) приближением $\mathbf{X}=\mathbf{X}_0$ и найти первое приближение к решению $\mathbf{X}_1=\mathbf{F}(\mathbf{X}_0)$, второе приближение $\mathbf{X}_2=\mathbf{F}(\mathbf{X}_1)$ и т. д., т. е. $\mathbf{X}_{k+1}=\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)$, где $k=0, 1, 2\ldots$

Если итерационный процесс сходится, то точное решение

$$\mathbf{X}^*=\lim_{k\to\infty}\mathbf{X}_k.$$

Практически решение получается при разности между соответствующими элементами векторов $\mathbf{X}_{k+1}$ и $\mathbf{X}_k$ меньше допустимой погрешности вычислений.

В соответствии с принципом сжатых отображений уравнение $\mathbf{X}=\mathbf{F}(\mathbf{X})$ имеет единственное решение $\mathbf{X}^*$, если $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ — сжатое отображение *n*-мерного пространства R^n в R^n, т. е. если существует постоянная $a<1$ такая, что

$$[F(x_i)-F(x_k)]\leqslant a[x_i-x_k]$$

для любых $x_i\in R^n$ и $x_k\in R^n$. При этом последовательность итераций сходится к решению $\mathbf{X}^*$ и для *k*-й итерации справедливо соотношение

$$[\mathbf{X}^*-\mathbf{X}_k]\leqslant\frac{a^k}{1-a}[\mathbf{X}_1-\mathbf{X}_0].$$

В этих выражениях символ $[\mathbf{X}]$ обозначает одну из норм вектора $\mathbf{X}$ — длину этого вектора, т. е.

$$[\mathbf{X}]=\sqrt{x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2}.$$

Для оценки скорости сходимости итерационных методов вводится понятие порядка метода. Обозначим $\varepsilon_k=|\mathbf{X}^*-\mathbf{X}_k|$ и $\varepsilon_{k+1}=|\mathbf{X}^*-\mathbf{X}_{k+1}|$; если между этими величинами выполняется соотношение $\varepsilon_{k+1}\leqslant\alpha(\varepsilon_k)^m$, где m — целое число, α — постоянный множитель, то порядок метода равен m. Очевидно, что чем больше m, тем быстрее уменьшается погрешность между точным и приближенным решениями, которая характеризуется величинами ε_k и ε_{k+1}. Для метода простой итерации

$$\varepsilon_{k+1}=|\mathbf{X}^*-\mathbf{X}_{k+1}|=|\mathbf{F}(\mathbf{X}^*)-\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)|$$

и

$$|\mathbf{F}(\mathbf{X}^*)-\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)|\leqslant a|\mathbf{X}^*-\mathbf{X}_k|.$$

Следовательно, $\varepsilon_{k+1}\leqslant a\varepsilon_k$ и порядок этого метода равен 1.

Рассмотренные выше уравнения легко преобразуются к виду $\mathbf{X}=\mathbf{F}(\mathbf{X})$, если к обеим частям уравнения прибавить вектор нескольких переменных. Например, если решается матричное уравнение с узловыми потенциалами, то

$$1\cdot\varphi+\mathbf{A}_л\,\mathbf{G}\mathbf{A}_л^{\mathrm{T}}\varphi+\mathbf{A}_н\,\mathbf{i}_н\left(\mathbf{A}_н^{\mathrm{T}}\varphi\right)=\mathbf{A}_л\,\mathbf{J}+1\cdot\varphi,$$

где элементы единичной матрицы, на которую умножается вектор φ, имеют разномерность проводимости, откуда

$$\varphi=\mathbf{A}_л\,\mathbf{J}-\mathbf{A}_л\,\mathbf{G}\mathbf{A}_л^{\mathrm{T}}\varphi-\mathbf{A}_н\,\mathbf{i}_н\left(\mathbf{A}_н^{\mathrm{T}}\varphi\right)+\varphi,$$

т. е. $\varphi=\mathbf{X}$ и $\mathbf{F}(\mathbf{X})=\mathbf{F}(\varphi)=\mathbf{A}_л\,\mathbf{J}-\mathbf{A}_л\,\mathbf{G}\mathbf{A}_л^{\mathrm{T}}\varphi-\mathbf{A}_н\,\mathbf{i}_н\left(\mathbf{A}_н^{\mathrm{T}}\varphi\right)+\varphi.$

Решение уравнений методом Ньютона

При решении матричного уравнения методом Ньютона оно записывается в виде

$$\mathbf{F}(\mathbf{X})=0,$$

где $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ — векторная нелинейная функция.

Это уравнение можно представить как систему скалярных уравнений $F_i(x_1, x_2, \ldots, x_n)=0$, которая раскладывается в ряд Тейлора в малой окрестности точки $\mathbf{X}_k$. Если ограничиться только первыми производными, то

$$F_i(x_1, x_2, \ldots, x_n)\approx F_i(x_{1(k)}, x_{2(k)}, \ldots, x_{n(k)})+\frac{\partial F_i}{\partial x_1}\Big|_{x=x_k}(x_1-x_{1(k)})+\frac{\partial F_i}{\partial x_2}\Big|_{x=x_k}(x_2-x_{2(k)})+\ldots+\frac{\partial F_i}{\partial x_{n-1}}\Big|_{x=x_k}(x_{n-1}-x_{n-1(k)})+\frac{\partial F_i}{\partial x_n}\Big|_{x=x_k}(x_n-x_{n(k)}).$$

Записывая такие выражения для всех $i=1\div n$ и объединяя их в одно матричное выражение, получаем

$$\mathbf{F}(\mathbf{X})\approx\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)+\mathbf{F}'(\mathbf{X}_k)(\mathbf{X}-\mathbf{X}_k),$$

где матрица частных производных (матрица Якоби), определенных при $\mathbf{X}=\mathbf{X}_{k+1}$,

$$\mathbf{F}'(\mathbf{X}_k)=\begin{Vmatrix}\partial F_1/\partial x_1 & \partial F_1/\partial x_2 & \ldots & \partial F_1/\partial x_n\\ \partial F_2/\partial x_1 & \partial F_2/\partial x_2 & \ldots & \partial F_2/\partial x_n\\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots\\ \partial F_n/\partial x_1 & \partial F_n/\partial x_2 & \ldots & \partial F_n/\partial x_n\end{Vmatrix}.$$

При $\mathbf{X}=\mathbf{X}_{k+1}$ $\mathbf{F}(\mathbf{X}_{k+1})\approx\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)+\mathbf{F}'(\mathbf{X}_k)(\mathbf{X}_{k+1}-\mathbf{X}_k)$.

Если точка $\mathbf{X}_k$ находится близко к точному решению $\mathbf{X}^*$, то можно принять $\mathbf{F}(\mathbf{X}_{k+1})=\mathbf{F}(\mathbf{X}^*)=0$. При этом получается расчетная формула метода Ньютона

$$\mathbf{X}_{k+1}=\mathbf{X}_k-[\mathbf{F}'(\mathbf{X}_k)]^{-1}\mathbf{F}(\mathbf{X}_k),$$

где $k=0, 1, 2\ldots$ Расчетную формулу можно представить также в виде

$$\mathbf{X}_{k+1}=\mathbf{X}_k+\Delta\mathbf{X}_k,$$

где вектор $\Delta\mathbf{X}_k$ определяется из уравнения $\mathbf{F}'(\mathbf{X}_k)\Delta\mathbf{X}_k=-\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)$.

Проверка условия сходимости итерационного процесса при решении уравнений сложных цепей является весьма трудоемкой задачей.

Обращение матрицы Якоби $\mathbf{F}'(\mathbf{X}_k)$ или решение последнего уравнения на каждой итерации требует большого числа вычислительных операций. Поэтому метод Ньютона можно видоизменить так, чтобы матрица $\mathbf{F}'(\mathbf{X}_k)$ оставалась постоянной для всех итераций:

$$\mathbf{X}_{k+1}=\mathbf{X}_k-[\mathbf{F}'(\mathbf{X}_0)]^{-1}\mathbf{F}(\mathbf{X}_k).$$

При этом число итераций, необходимых для получения решения, возрастает, однако каждая итерация выполняется проще и быстрее. Можно также изменять матрицу Якоби через некоторое количество итераций.

Метод Ньютона является методом второго порядка ($m=2$); итерационный процесс сходится весьма быстро при хорошем начальном приближении.

Для приведения уравнений нелинейных цепей к виду $\mathbf{F}(\mathbf{X})=0$ нужно все слагаемые уравнений перенести в левую часть. Например, матричное уравнение с узловыми потенциалами записывается в виде

$$\mathbf{A}_л\,\mathbf{G}\mathbf{A}_л^{\mathrm{T}}\varphi+\mathbf{A}_н\,\mathbf{i}_н\left(\mathbf{A}_н^{\mathrm{T}}\varphi\right)-\mathbf{A}_л\,\mathbf{J}=0,$$

где $\varphi=\mathbf{X}$ и $\mathbf{F}(\mathbf{X})=\mathbf{F}(\varphi)=\mathbf{A}_л\,\mathbf{G}\mathbf{A}_л^{\mathrm{T}}\varphi+\mathbf{A}_н\,\mathbf{i}_н\left(\mathbf{A}_н^{\mathrm{T}}\varphi\right)-\mathbf{A}_л\,\mathbf{J}.$

Матрица Якоби

$$\mathbf{F}'(\varphi)=\left\|\frac{dF(\varphi)}{d\varphi}\right\|=\mathbf{A}_л\,\mathbf{G}\mathbf{A}_л^{\mathrm{T}}+\mathbf{A}_н\left\|\frac{di_н}{du_н}\right\|\cdot\left\|\frac{du_н}{d\varphi}\right\|,$$

где

$$\left\|\frac{di_н}{du_н}\right\|=\operatorname{diag}\left(\frac{di_{m+1}}{du_{m+1}}, \frac{di_{m+2}}{du_{m+2}}, \ldots, \frac{di_n}{du_n}\right)=\operatorname{diag}[g_{m+1}(u_{m+1}), g_{m+2}(u_{m+2}), \ldots, g_n(u_n)]$$

— диагональная матрица дифференциальных проводимостей нелинейных ветвей (эти ветви имеют номера $m+1$, $m+2$, ..., n); $\|du_n/d\varphi\|=\mathbf{A}_н^{\mathrm{T}}$.

Таким образом,

$$\mathbf{F}'(\varphi)=\mathbf{A}_л\,\mathbf{G}\mathbf{A}_л^{\mathrm{T}}+\mathbf{A}_н\,\mathbf{G}_н(u_н)\,\mathbf{A}_н^{\mathrm{T}}=\mathbf{A}_л\,\mathbf{G}\mathbf{A}_л^{\mathrm{T}}+\mathbf{A}_н\,\mathbf{G}_н\left(\mathbf{A}_н^{\mathrm{T}}\varphi\right)\mathbf{A}_н^{\mathrm{T}}.$$

Дискретные линейные модели нелинейных резистивных цепей

При решении уравнений нелинейной резистивной цепи методом Ньютона каждой итерации можно поставить в соответствие линейную резистивную эквивалентную схему. Если, на-

пример, применяется матричное уравнение с узловыми потенциалами, то

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + \Delta\varphi_k,$$

где $\Delta\varphi_k$ определяется из уравнения

$$\mathbf{F}'(\varphi_k)\,\Delta\varphi_k = -\mathbf{F}(\varphi_k)$$

и

$$\left[\mathbf{A}_л\,\mathbf{G}\mathbf{A}_л^T + \mathbf{A}_н\,\mathbf{G}_н(\mathbf{u}_{нk})\,\mathbf{A}_н^T\right]\varphi_{k+1} = \mathbf{A}_л\,\mathbf{J} + \mathbf{A}_н\mathbf{J}_н,$$

где

$$\mathbf{u}_{нk} = \mathbf{A}_н^T\varphi_k;\quad \mathbf{J}_н = \mathbf{G}(\mathbf{u}_{нk})\mathbf{u}_{нk} - \mathbf{i}_н(\mathbf{u}_{нk}).$$

Для расчета вектора φ_{k+1} можно составить эквивалентную резистивную схему, которая получается при линеаризации характеристики $i_j(u_j)$ в точке $u_j = u_{j(k)}$, т. е. при замене каждой j-й нелинейной ветви исходной схемы параллельным соединением (рис. 4.48) проводимости $g_j(u_{j(k)})$ и источника тока

$$J_{нj} = g_j(u_{j(k)})\,u_{j(k)} - i_j(u_{j(k)}).$$

Аналогично расчет вектора контурных токов для $(k+1)$-й итерации может быть выполнен при помощи эквивалентной линейной схемы, которая получается при замене каждой j-й нелинейной ветви последовательности соединением сопротивления $r_j(i_{j(k)})$ и источника ЭДС

$$E_{нj} = -r_j(i_{j(k)})\,i_{j(k)} + u_j(i_{j(k)}),$$

как показано на рис. 4.49.

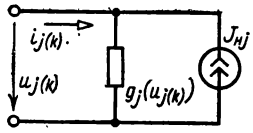


Рис. 4.48

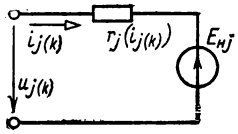


Рис. 4.49

Таким образом, расчет нелинейной резистивной цепи при решении ее уравнений по методу Ньютона может быть сведен к расчету множества линейных резистивных схем — дискретных моделей цепи. Дискретная модель для расчета переменных $(k+1)$-й итерации получается заменой нелинейных g-ветвей схемой по рис. 4.48, а r-ветвей— схемой по рис. 4.49; параметры этих схем g_j, $J_{нj}$ и r_j, $E_{нj}$ определяются соответственно при напряжениях и токах k-й итерации.

Пример. Рассчитаем потенциалы узлов цепи по рис. 4.50, *а* при $g_1=0{,}5$ См, $g_2=3$ См, $g_3=1$ См, $J_1=3$ А и нелинейных характеристиках $i_4(u_4)=u_4^3/4+2u_4$, $i_5(u_5)=u_5^2/2+3u_5$ (токи — в амперах, напряжения в вольтах).

Дискретная линейная модель показана на рис. 4.50, *б*. Дифференциальные проводимости нелинейных ветвей соответственно равны

$$g_{4(k)} = di_4/du_4\big|_{u_4=u_{4(k)}} = 3u_{4(k)}^2 + 2;$$

$$g_{5(k)} = di_5/du_5\big|_{u_5=u_{5(k)}} = u_{5(k)} + 3.$$

Параметры источников тока

$$J_{4(k)} = g_{4(k)}\,u_{4(k)} - i_4(u_{4(k)});$$

$$J_{5(k)} = g_{5(k)}\,u_{5(k)} - i_5(u_{5(k)}).$$

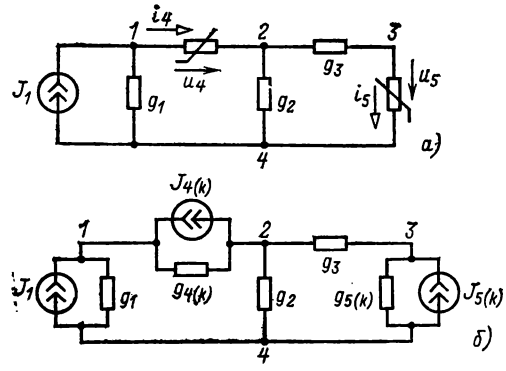


Рис. 4.50

Запишем уравнения для расчета узловых потенциалов $(k+1)$-й итерации при $\varphi_4=0$

$$\begin{Vmatrix} g_1+g_{4(k)} & -g_{4(k)} & 0 \\ -g_{4(k)} & g_2+g_3+g_{4(k)} & -g_3 \\ 0 & -g_3 & g_3+g_{5(k)} \end{Vmatrix} \times$$

$$\times \begin{Vmatrix} \varphi_{1(k+1)} \\ \varphi_{2(k+1)} \\ \varphi_{3(k+1)} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} J_1+J_{4(k)} \\ -J_{4(k)} \\ J_{5(k)} \end{Vmatrix}.$$

Для $k=0$ произвольно задаемся значениями потенциалов $\varphi_{3(0)}=0$, $\varphi_{1(0)}=\varphi_{2(0)}$; при этом $u_{4(0)}=\varphi_{1(0)}-\varphi_{2(0)}=0$, $u_{5(0)}=\varphi_{3(0)}=0$, $g_{4(0)}=2$ См, $g_{5(0)}=3$ См, $J_{4(0)}=0$, $J_{5(0)}=0$. Из узловых уравнений

$$\begin{Vmatrix} 2{,}5 & -2 & 0 \\ -2 & 6 & -1 \\ 0 & -1 & 4 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \varphi_{1(1)} \\ \varphi_{2(1)} \\ \varphi_{3(1)} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \end{Vmatrix}$$

находим $\varphi_{1(1)}=1{,}66$ В, $\varphi_{2(1)}=0{,}58$ В, $\varphi_{3(1)}=0{,}14$ В.

Аналогично составляются и решаются уравнения для $k=1$. При этом $g_{4(1)}=5{,}50$ См, $g_{5(1)}=3{,}14$ См, $J_{4(1)}=2{,}52$ А, $J_{5(1)}=0{,}01$ А. Решив уравнения, получим $\varphi_{1(2)}=1{,}47$ В, $\varphi_{2(2)}=0{,}60$ В, $\varphi_{3(2)}=0{,}15$ В. Для $k=2$ находим $\varphi_{1(3)}=1{,}45$ В, $\varphi_{2(3)}=0{,}61$ В, $\varphi_{3(3)}=0{,}15$ В. Последующие итерации практически не изменяют полученные значения потенциалов.

Графические методы расчета нелинейных резистивных цепей аналогичны графическим методам расчета магнитных цепей (см. § 4.7).

Литература [4.1—4.7, 4.12—4.15, 4.18—4.24, 4.41, 4.50—4.56, 4.71, 4.72].

4.7. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

Магнитные цепи постоянного тока

Расчет неразветвленных и разветвленных магнитных цепей, если можно пренебречь потоками рассеяния, основан на применении законов непрерывности магнитного потока

$$\oint \mathbf{B}\,d\mathbf{S} = \sum_i B_i S_i = \sum_i \Phi_i = 0$$

для каждого узла магнитной цепи (аналог 1-го закона Кирхгофа для электрической цепи) и полного тока

$$\oint \boldsymbol{H}\,d\boldsymbol{l} = \sum_i H_i\,l_i = F_k$$

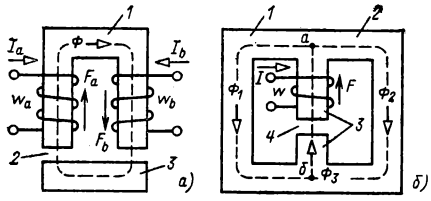


Рис. 4.51

для каждого контура цепи (аналог 2-го закона Кирхгофа для электрической цепи). Здесь B_i — магнитная индукция, Тл; Φ_i — магнитный поток, Вб; S_i — площадь поперечного сечения, м^2, для i-й ветви или участка; H_i — напряженность магнитного поля, А/м; l_i — средняя длина магнитной линии, м, i-й ветви или участка k-го контура;

$$F_k = \sum_m I_m w_m$$

— МДС k-го контура; I_m — ток, А, в катушке с w_m витками, которая входит в k-й контур. Положительные направления МДС и тока связаны правилом правого винта.

Примеры неразветвленной и разветвленной магнитных цепей представлены на рис. 4.51, *а* и *б*.

Расчет с применением средних длин предполагает, что поперечные размеры участков магнитной цепи, изготовленных из ферромагнитных материалов, значительно меньше их длин, т. е. напряженность поля в любой точке поперечного сечения одна и та же; соответственно одинаковы и магнитные индукции (однородное поле).

На каждом участке из ферромагнитного материала напряженность магнитного поля и магнитная индукция связаны соотношением

$$H_i = B_i/\mu_{ri}\mu_0,$$

где μ_{ri} — относительная магнитная проницаемость материала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Для воздушных зазоров

$$H = B/\mu_0.$$

При сделанных допущениях относительно размеров

$$B_i = \Phi_i/S_i.$$

Поэтому

$$\sum_i H_i l_i = \sum_i \frac{l_i}{\mu_{ri}\mu_0 S_i}\Phi_i = \sum_i R_i \Phi_i,$$

где $R_i = l_i/\mu_{ri}\mu_0 S_i$ — магнитное сопротивление i-го участка (А/Вб = 1/Гн); $H_i l_i = U_{мi}$ — разность магнитных потенциалов (магнитное напряжение) на участке; $U_{мi} = R_i\Phi_i$ — закон Ома для участка магнитной цепи.

Зависимости $B_i(H_i)$ ферромагнитных материалов—кривые намагничивания, определяющие μ_{ri}, — нелинейные (см. § 16.1), т. е. $\mu_{ri} \neq$ const и зависит от рабочей точки на кривой намагничивания. Для магнитно-мягких материалов, у которых можно пренебречь гистерезисом, в качестве кривой намагничивания

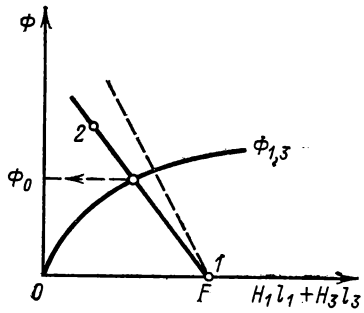


Рис. 4.52

можно взять основную кривую намагничивания (совокупность вершин симметричных петель гистерезиса).

Для неразветвленной цепи по рис. 4.51, *а* магнитный поток Ф в любом поперечном сечении один и тот же. По закону полного тока

$$H_1l_1 + H_2l_2 + H_3l_3 = F_a + F_b = I_a w_a + I_b w_b,$$

где H_1, H_3 — напряженности магнитного поля соответственно для участков *1* и *3*; H_2 — напряженность магнитного поля в каждом из воздушных зазоров, которую можно считать одинаковой в любой точке (однородное поле), если длины воздушных зазоров много меньше их поперечных размеров и зазоры простой формы, как на рис. 4.51. Магнитные индукции B_1 и B_3 участков *1* и *3* связаны с напряженностями поля H_1 и H_3 кривыми намагничивания ферромагнитных материалов, из которых изготовлены эти участки. Для воздушных зазоров $B_2 = \mu_0 H_2$. При сделанных допущениях о размерах участков магнитной цепи поток $\Phi = B_1S_1 = B_2S_2 = B_3S_3$, где S_1, S_2 и S_3 — соответственно площади поперечного сечения участков *1*, *2* и *3*.

Для разветвленной цепи по рис. 4.51, *б* при тех же предположениях относительно размеров из закона непрерывности магнитного потока следует, что $\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_3$ и $B_1S_1 + B_2S_2 = B_3S_3$. По закону полного тока для левого контура: $-H_1l_1 - H_3l_3 - H_4l_4 = -F$, для правого: $H_3l_3 + H_4l_4 + H_2l_2 = F$.

При расчетах нелинейных магнитных цепей применяют различные графические, графоаналитические, аналитические и численные методы.

В цепи по рис. 4.51, *а* при заданных размерах (кроме длины l_2 суммарного воздушного зазора), материалах участков и МДС $F = F_a + F_b$ магнитный поток можно рассчитать графическим методом пересечений. Задаем ряд значений потока $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3$, вычисляем соответствующие значения B_1, B_2, B_3, по кривым намагничивания определяем H_1 и H_3. Строим (рис. 4.52) зависимость $\Phi_{1,3}(H_1l_1 + H_3l_3)$ — вебер-амперную характеристику. Из закона полного тока следует, что $H_2l_2 = F - (H_1l_1 + H_3l_3)$, т. е. $\Phi_2(H_1l_1 + H_3l_3) = \Phi_2(F - H_2l_2)$. Это уравнение прямой, так как в воздушном зазоре магнитная индукция и напряженность магнитного поля связаны линейной зависимостью $B_2 = \mu_0 H_2$. Длина воздушного зазора l_2 может быть задана или выбирается. Уравнение прямой строим по двум точкам. При $\Phi_2 = 0$ имеем $H_2 = 0$ и $H_1l_1 + H_3l_3 = F$ (точка *1*), при любом

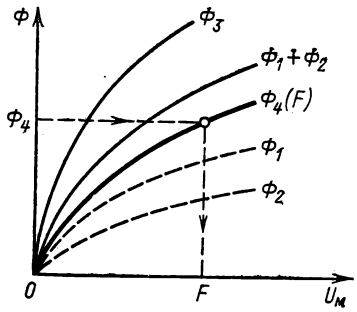


Рис. 4.53

выбранном значении Φ_2 находим B_2 и H_2 и $H_1l_1+H_3l_3=F-H_2l_2$ (точка 2). В точке пересечения выполняется условие $\Phi_1=\Phi_2=\Phi_3$, которое и определяет искомое значение потока $\Phi=\Phi_0$. При другой длине воздушного зазора получается другая прямая (другая точка 2) — пунктирная прямая на рис. 4.52.

В цепи по рис. 4.51, *б* при заданных размерах, материалах участков и потоке Φ_4 в воздушном зазоре необходимое значение МДС $F=Iw$ можно определить графическим суммированием вебер-амперных характеристик. На рис. 4.53 построены вебер-амперные характеристики трех ветвей цепи: $\Phi_1(U_{м1})$, $\Phi_2(U_{м2})$, $\Phi_3(U_{м3}+U_{м4})$, где $U_{м1}=H_1l_1=U_{м2}=H_2l_2=U_{маб}$; $\Phi_3=\Phi_4$; $U_{м3}=H_3l_3$; $U_{м4}=H_4l_4$. Для построения каждой из характеристик при известной кривой намагничивания умножаем значения индукции на площадь поперечного сечения участка, а соответствующие значения напряженности магнитного поля на среднюю длину. Для воздушного зазора при каждом значении $B_4=\Phi_4/S_4$ получаем $H_4=B_4/\mu_0$. Относительно узловых точек *а* и *б* ветви *1* и *2* соединены параллельно, т. е. потоки Φ_1 и Φ_2 суммируются. Суммированием ординат кривых $\Phi_1(U_м)$ и $\Phi_2(U_м)$ получена зависимость $\Phi_1+\Phi_2=f(U_{маб})$. Так как $F=U_{м3}+U_{м4}+U_{маб}$ и $\Phi_1+\Phi_2=\Phi_3$, то суммированием абсцисс характеристик $\Phi_3(U_{м3}+U_{м4})$ и $\Phi_1+\Phi_2=f(U_{маб})$ получаем зависимость $\Phi_4=\Phi_3$ от F. Теперь при заданном значении Φ_4 находим МДС F. По этой же характеристике можно определить $\Phi_4=\Phi_3$, Φ_1 и Φ_2 при заданной МДС F.

Суммирование характеристик можно выполнить в табличной форме и строить только результирующую характеристику $\Phi_4(F)$.

При заданной МДС определение магнитных потоков можно выполнить и другим построением (рис. 4.54). Суммарная характеристика $\Phi_1+\Phi_2=f(U_{м\,аб})$ та же, что и на рис. 4.53. Вместо характеристики $\Phi_3(U_{м3}+U_{м4})$ построена характеристика $\Phi_3(U_{м\,аб})$, где $U_{м\,аб}=F-(U_{м3}+U_{м4})$; эта характеристика получена смещением характеристики $\Phi_3(U_м)$ (рис. 4.53) по оси абсцисс на F и зеркальным построением относительно оси ординат.

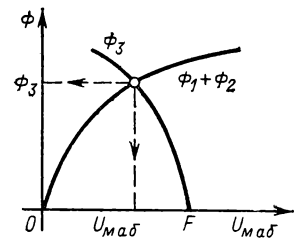


Рис. 4.54

Та же задача может быть решена методом последовательных приближений при следующей последовательности вычислений: выбирается значение $\Phi_1\to B_1=\Phi_1/S_1\to H_1$ (по кривой намагничивания)$\to H_1l_1=U_{м\,аб}=H_2l_2\to H_2\to B_2$ (по кривой намагничивания)$\to\Phi_2=B_2S_2\to\Phi_3=\Phi_4=\Phi_1+\Phi_2\to B_3=\Phi_3/S_3\to H_3$ (по кривой намагничивания)$\to H_3l_3$, $B_4=\Phi_4/S_4\to H_4=B_4/\mu_0\to H_4l_4$, $U_{м3}+U_{м4}=H_3l_3+H_4l_4\to F=U_{м3}+U_{м4}+U_{м\,аб}$. Если полученное значение F не совпадает с заданным, то выбирается новое значение Φ_1 и все вычисления повторяются до тех пор, пока полученное значение МДС не будет отличаться от заданного достаточно мало (на допустимое значение).

Аналитические методы расчета

Между уравнениями магнитной цепи постоянного тока и нелинейной электрической цепи постоянного тока существует формальная аналогия. Аналогичные величины: магнитный поток Φ и ток I, магнитное напряжение $Hl=U_м$ и напряжение U, МДС F и ЭДС E, магнитное сопротивление R и сопротивление r. Для магнитной цепи можно составить эквивалентную электрическую цепь, например для магнитных цепей по рис. 4.51 на рис. 4.55 показаны эквивалентные электрические цепи.

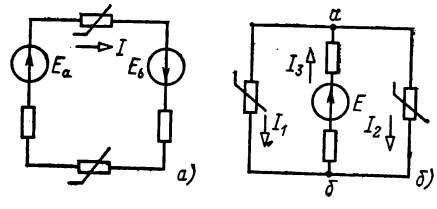


Рис. 4.55

Если зависимости $B(H)$, тем самым и $\Phi(U_м)$, заданы аналитически или аппроксимированы аналитическими зависимостями, то расчет цепи может быть выполнен теми же аналитическими методами, что и нелинейной цепи постоянного тока (см. § 4.6).

Магнитная цепь с постоянным магнитом

В магнитной цепи из магнитно-мягкого материала при отсутствии токов в катушках магнитного поля нет, т. е. на всех участках $B_i=0$, $\Phi_i=0$, $H_i=0$ (если пренебречь гистерезисом). В магнитных цепях с постоянными магнитами из-за гистерезиса может быть магнитное поле и при отсутствии МДС.

Если магнитная цепь постоянного магнита (рис. 4.56, *а*) была намагничена (током в наложенной обмотке), то и при отсутствии тока магнитный поток Φ в цепи не равен нулю. Принимая те же условия о размерах цепи, что

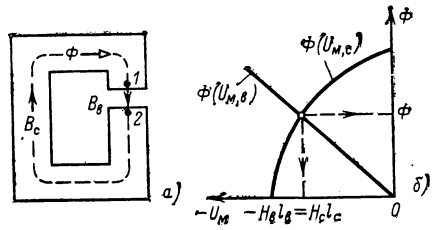


Рис. 4.56

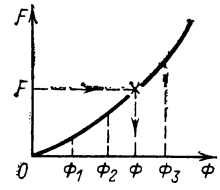


Рис. 4.57

и для магнитной цепи постоянного тока, и считая равными поперечные сечения ферромагнитного — стального участка и воздушного зазора, т. е. $S_с = S_в = S$, получаем $B_с = B_в = Ф/S$. В зазоре напряженность магнитного поля $H_в = B_в/\mu_0$ совпадает по направлению с индукцией $B_в$, но в стали напряженность магнитного поля должна быть направлена навстречу индукции $B_с$, что следует из закона полного тока: $\oint \mathbf{H}\, d\mathbf{l} = 0$ или $H_с l_с + H_в l_в = 0$ и $H_с = -H_в l_в / l_с$. Это означает, что рабочая точка находится на кривой размагничивания (см. разд. 16), которая построена на рис. 4.56, *б* в другом масштабе — в виде вебер-амперной характеристики $Ф(U_м)$, где $Ф = Ф_с = B_с S$; $U_м = U_{м12} = -U_{м.с} = -H_с l_с$. Зависимость потока в зазоре $Ф = Ф_в = B_в S$ от того же магнитного напряжения $U_{м12} = U_{м.в} = H_в l_в$ строим так же, как на рис. 4.52, только прямая $Ф(U_{м.в})$ проходит через начало координат ($F = 0$). Точка пересечения определяет магнитный поток в зазоре $Ф = Ф_в = Ф_с$ и магнитное напряжение между точками *1* и *2*, а значит, индукцию в стали и в воздухе и напряженность магнитного поля.

Магнитные цепи переменного тока

В устройствах, содержащих магнитопроводы и катушки (обмотки), при синусоидальных напряжениях питания токи из-за нелинейности кривых намагничивания могут быть несинусоидальными (содержать высшие гармоники) и, наоборот, при синусоидальных токах могут быть несинусоидальные напряжения. Если влиянием высших гармоник можно пренебречь (их уровень невелик и их возникновение не является принципиально важным для работы устройства), то несинусоидальные величины заменяют эквивалентными синусоидальными (см. «Эквивалентные синусоиды»). Применение эквивалентных величин дает возможность вести расчет комплексным методом.

Комплексное сопротивление какого-либо участка магнитной цепи

$$\underline{Z}_\mu = R_\mu + jX_\mu = \rho_R\, l/S + j\rho_X\, l/S,$$

где R_μ и X_μ — активное и реактивное (учитывающее потери) сопротивления участка, $Гн^{-1}$; l и S — его средняя длина и площадь поперечного сечения; ρ_R и ρ_X — удельные активное и реактивное магнитные сопротивления материала, м/Гн. Зависимости $\rho_R(B)$ и $\rho_X(B)$, как и кривые намагничивания, определяются экспериментально для каждой марки стали или другого ферромагнитного материала, причем значения ρ_X зависят от частоты.

Расчеты магнитной цепи переменного тока выполняются теми же методами, что и при постоянном токе, но все величины в уравнениях по закону полного тока записываются в комплексной форме:

$$\underline{F}_k = \sum_i \underline{H}_i\, l_i = \sum_i \underline{Z}_{\mu i}\, \underline{Ф}_i.$$

Рассчитаем МДС $F = F_a + F_b$ неразветвленной цепи по рис. 4.51, *а* при заданных размерах и материале магнитной цепи и требуемом действующем значении магнитного потока Ф. Индукции на участках $B_1 = Ф_1/S_1$, $B_2 = Ф_2/S_2$, $B_3 = Ф_3/S_3$. Для участков из ферромагнитного материала при значениях B_1 и B_3 определяем по зависимостям $\rho_R(B)$ и $\rho_X(B)$ удельные активные и реактивные магнитные сопротивления ρ_{R1}, ρ_{X1}, ρ_{R3}, ρ_{X3} и магнитные сопротивления $\underline{Z}_{\mu 1}$ и $\underline{Z}_{\mu 3}$. Для воздушных зазоров магнитное сопротивление $R_2 = l_2/\mu_0 S_2$, где l_2 — суммарная длина воздушных зазоров.

МДС $\underline{F} = (\underline{Z}_{\mu 1} + \underline{Z}_{\mu 3} + R_2)\underline{Ф}$ (с нулевой начальной фазой выбран магнитный поток) и

$$F = \sqrt{(R_{\mu 1} + R_{\mu 3} + R_2)^2 + (X_{\mu 1} + X_{\mu 3})^2}\,.$$

Так называемую обратную задачу — задана МДС, определяется магнитный поток—можно решить, например, методом последовательных приближений: задавать значения Ф и рассчитывать F, пока разница между заданным и полученным значениями МДС не станет достаточно малой. В качестве первого значения Ф, при котором значение МДС получится меньше заданной, можно выбрать $Ф_1 = F/R_2$, т. е. без учета магнитного сопротивления ферромагнитных участков. Число необходимых вычислений можно сократить, если строить зависимость $F(Ф)$, как на рис. 4.57.

Для разветвленной симметричной магнитной цепи по рис. 4.51, *б* ($l_1 = l_2$, $S_1 = S_2$) при заданных размерах, материале и потоке в воздушном зазоре $Ф_4 = Ф_3$ нельзя непосредственно вычислить МДС F, как для неразветвленной цепи. Действительно, можно определить $B_3 = Ф_3/S_3$, ρ_{R3}, ρ_{X3}, $\underline{Z}_{\mu 3}$. Магнитное напряжение между узловыми точками $\underline{U}_{м\,аб} = \underline{F} - (R_4\underline{Ф}_4 + \underline{Z}_{\mu 3}\underline{Ф}_3)$, т. е. содержит две неизвестные величины: магнитное напряжение и МДС. Задачу можно решить методом последовательных приближений, задавая поток $Ф_1$ или $Ф_2$. Последовательность вычислений: $Ф_1 \to B_1 = Ф_1/S_1 \to \rho_{R1}$, ρ_{X1}, $\underline{Z}_{\mu 1} \to \underline{U}_{м\,аб} = \underline{Z}_{\mu 1}\underline{Ф}_1$, $\underline{Ф}_3 = \underline{Ф}_4 = 2\underline{Ф}_1$.

Расчет повторяется до получения значения $Ф_4$, достаточно близкого к заданному. Затем определяем $B_3 = Ф_3/S_3 \to \rho_{R3}$, ρ_{X3}, $\underline{Z}_{\mu 3}$ и $\underline{F} = \underline{U}_{м\,аб} + (R_4\underline{Ф}_4 + \underline{Z}_{\mu 3}\underline{Ф}_3)$.

Аналогичен расчет при заданной МДС.

Взаимная связь магнитного потока, ЭДС индукции, напряжения и тока в катушке со стальным магнитопроводом

Напряжение между выводами катушки (рис. 4.58)

$$u = w\,d\Phi/dt + ri + L_{\text{рас}}\,di/dt,$$

где Φ — основной магнитный поток, замыкающийся по магнитопроводу; w — число витков обмотки катушки; r — сопротивление обмотки; $L_{\text{рас}}=\Psi_{\text{рас}}/i$ — индуктивность рассеяния, зависящая от потокосцепления рассеяния $\Psi_{\text{рас}}$ или магнитного потока, замыкающегося вне магнитопровода.

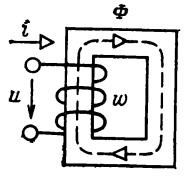


Рис. 4.58

Наводимая магнитным потоком Φ в обмотке ЭДС $e=-w\,d\Phi/dt$. Среднее значение

$$E_{\text{ср}} = 2fw\,(\Phi_{max} - \Phi_{min}).$$

Если $\Phi_{max}=-\Phi_{min}=\Phi_m$, то $E_{\text{ср}}=4fw\Phi_m$. Действующее значение ЭДС $E=k_\Phi E_{\text{ср}}$, где k_Φ — коэффициент формы. Для синусоидальной ЭДС $k_\Phi=1{,}11$ и $E=4{,}44\,fw\Phi_m$.

Для несинусоидальных ЭДС и магнитного потока последняя формула справедлива для каждой из гармоник в отдельности.

Зависимость между магнитным потоком Φ и током i в обмотке катушки, т. е. $\Phi(i)$, если не учитывать гистерезиса и вихревых токов, задается кривой намагничивания материала магнитопровода $B(H)$, причем

$$\Phi = BS \text{ и } iw = Hl_{\text{ср}},$$

где B — магнитная индукция; H — напряженность магнитного поля; iw — магнитодвижущая сила (МДС); S — площадь поперечного сечения магнитопровода катушки; $l_{\text{ср}}$ — средняя длина линий магнитного потока.

При синусоидальном напряжении, приложенном к катушке,

$$u = U_m \cos\omega t = U_m \sin(\omega t + 90°)$$

магнитный поток изменяется также синусоидально (если пренебречь сопротивлением обмотки и потоком рассеяния):

$$\Phi = \frac{1}{w}\int u\,dt = \Phi_m \sin\omega t; \quad \Phi_m = U/4{,}44fw.$$

Кривая тока, который называется током намагничивания, несинусоидальна и может быть построена графически (рис. 4.59, *а*):

$$i_\mu = I_{1m}\sin\omega t - I_{3m}\sin 3\omega t + I_{5m}\sin 5\omega t - \ldots$$

Заменив ток i_μ эквивалентной синусоидой, можно построить векторную диаграмму (рис. 4.59, *б*). Так как потерь нет, то вектор эквивалентной синусоиды тока I_μ отстает по фазе относительно напряжения на 90°.

Если катушка питается от источника синусоидального тока i, то поток и напряжение

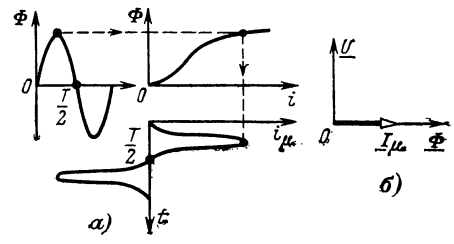


Рис. 4.59

на катушке несинусоидальны. Кривая потока может быть построена по кривой намагничивания аналогично построению тока на рис. 4.59, *а*. Напряжение $u=w\,d\Phi/dt$. Векторная диаграмма (рис. 4.59, *б*) справедлива для эквивалентных синусоид напряжения и магнитного потока. Схема замещения катушки без потерь состоит из одного нелинейного индуктивного элемента.

Схема замещения катушки со стальным магнитопроводом при учете потерь

На схеме замещения (рис. 4.60, *а*) нелинейная проводимость g учитывает потери в стали. На рис. 4.60, *б* показана векторная диаграмма для эквивалентных синусоид. Из-за потерь ток I отстает от напряжения на угол, меньший 90°, и раскладывается на активную составляющую I_a и реактивную I_p.

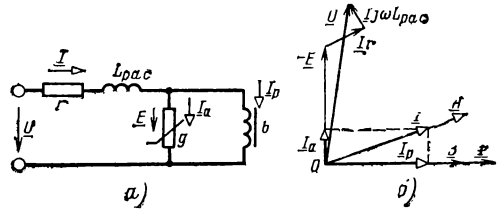


Рис. 4.60

Если заданы U, r, $L_{\text{рас}}$, то можно считать $\Phi_m \approx U/4{,}44\,fw$; $B_m=\Phi_m/S$. При $B_m=0{,}5\div 1{,}6$ Тл удельная мощность, затрачиваемая на перемагничивание стали (потери на гистерезис и вихревые токи),

$$p_{\text{с}} = p_{1,0}\,(B_m)^n\,(f/50)^{1,3},$$

где $n=5{,}69\lg(p_{1,5}/p_{1,0})$; $p_{1,0}$ и $p_{1,5}$ — удельные потери соответственно при $B_m=1$ Тл и $B_m=1{,}5$ Тл для $f=50$ Гц (ГОСТ 21427.0-75).

Нередко для материала магнитопровода при данной частоте и толщине пластин задаются или определяются экспериментально кривые удельных (на единицу массы G) потерь $P_0(B_m)$ и реактивной мощности $Q_0(B_m)$. Тогда потери в стали и реактивная мощность

$$P_{\text{с}} = P_0 G \approx UI_{\text{a}} = U^2 g; \quad Q = Q_0 G \approx UI_{\text{р}} = U^2 b,$$

откуда можно найти g и b при данном U, а также I_{a}, $I_{\text{р}}$ и $I = \sqrt{I_{\text{a}}^2 + I_{\text{р}}^2}$.

Литература [4.1—4.6, 4.50, 4.52—4.54, 4.57—4.59].

4.8. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ

Численные методы

В общем случае нелинейные электрические цепи содержат не только линейные и нелинейные резистивные элементы (см. § 4.6), но и реактивные (индуктивные и емкостные) элементы. Нелинейные индуктивности и емкости описываются соответственно вебер-амперными и кулон-вольтными характеристиками

$$\Psi_j = \Psi_j(i_j), \quad q_k = q_k(u_k),$$

где Ψ_j и i_j — потокосцепление и ток j-й индуктивности; q_k и u_k — заряд и напряжение k-й емкости. Для всех индуктивных и емкостных элементов можно записать матричные соотношения (нелинейные векторные функции)

$$\Psi_j = \Psi(\mathbf{i}_L), \quad \mathbf{q} = \mathbf{q}(\mathbf{u}_C),$$

где Ψ, $\mathbf{i}_L$, $\mathbf{q}$, $\mathbf{u}_C$ — векторы потокосцеплений, индуктивных токов, зарядов и емкостных напряжений. Ниже предполагаем, что зависимости $\Psi(i_{Lj})$ и $q(u_{Ck})$ однозначны, а линейные индуктивные и емкостные элементы рассматриваются как частный случай нелинейных. Вместо приведенных зависимостей нелинейные реактивные элементы могут быть описаны и матрицами дифференциальных индуктивностей $\mathbf{L}(\mathbf{i}_L)$ и емкостей $\mathbf{C}(\mathbf{u}_C)$.

Расчет переходных процессов в нелинейных цепях — сложная задача, которая, как правило, может быть решена только численными методами; наиболее широко применяются метод переменных состояния и метод дискретных моделей.

Метод переменных состояния

Электрическую цепь надо описать системой дифференциальных уравнений первого порядка, а также алгебраическими уравнениями (см. § 4.4). Представим цепь в виде линейного резистивного многополюсника, к выводам которого присоединены нелинейные резистивные и реактивные двухполюсники, а также независимые источники ЭДС $e=e(t)$ и тока $J=J(t)$ (рис. 4.61, *а*). Для линейного многополюсника можно записать в матричной форме уравнения:

$$\begin{Vmatrix} \mathbf{i}_C \\ \mathbf{u}_L \end{Vmatrix} = \mathbf{H}_{11}\begin{Vmatrix} \mathbf{u}_C \\ \mathbf{i}_L \end{Vmatrix} + \mathbf{H}_{12}\begin{Vmatrix} \mathbf{u}_R \\ \mathbf{i}_G \end{Vmatrix} + \mathbf{H}_{13}\begin{Vmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{J} \end{Vmatrix};$$

$$\begin{Vmatrix} \mathbf{i}_R \\ \mathbf{u}_G \end{Vmatrix} = \mathbf{H}_{21}\begin{Vmatrix} \mathbf{u}_C \\ \mathbf{i}_L \end{Vmatrix} + \mathbf{H}_{22}\begin{Vmatrix} \mathbf{u}_R \\ \mathbf{i}_G \end{Vmatrix} + \mathbf{H}_{23}\begin{Vmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{J} \end{Vmatrix};$$

$$\begin{Vmatrix} \mathbf{i}_e \\ \mathbf{u}_J \end{Vmatrix} = \mathbf{H}_{31}\begin{Vmatrix} \mathbf{u}_C \\ \mathbf{i}_L \end{Vmatrix} + \mathbf{H}_{32}\begin{Vmatrix} \mathbf{u}_R \\ \mathbf{i}_G \end{Vmatrix} + \mathbf{H}_{33}\begin{Vmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{J} \end{Vmatrix}.$$

В этих уравнениях $\mathbf{u}_R$, $\mathbf{i}_R$ и $\mathbf{u}_G$, $\mathbf{i}_G$ — векторы напряжений и токов резистивных элементов, заданных соответственно зависимостью $u_R=u_R(i_R)$ или $i_G=i_G(u_G)$, т. е. нелинейных r- или g-ветвей; $\mathbf{H}_{ij}$ — подматрицы гибридной матрицы $\mathbf{H}$ (предполагается, что она существует).

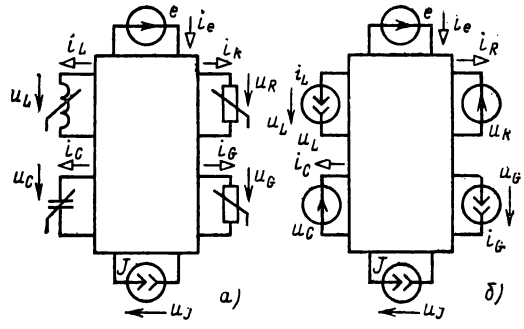


Рис. 4.61

Если учесть, что $i_C=C(u_C)du_C/dt$, $u_L=L(i_L)di_L/dt$, и обозначить

$$\mathbf{x} = \begin{Vmatrix} \mathbf{u}_C \\ \mathbf{i}_L \end{Vmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{Vmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{J} \end{Vmatrix}, \quad \mathbf{w} = \begin{Vmatrix} \mathbf{u}_R \\ \mathbf{i}_G \end{Vmatrix}, \quad \mathbf{z} = \begin{Vmatrix} \mathbf{i}_R \\ \mathbf{u}_G \end{Vmatrix},$$

то получаем системы нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений:

$$\mathbf{D}(\mathbf{x})\cdot\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1\mathbf{x} + \mathbf{C}_1\mathbf{w}(\mathbf{z}) + \mathbf{B}_1\mathbf{v};$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}_2\mathbf{x} + \mathbf{C}_2\mathbf{w}(\mathbf{z}) + \mathbf{B}_2\mathbf{v},$$

где $\mathbf{D}(\mathbf{x})=\mathrm{diag}[C(u_C), L(i_L)]$ — матрица параметров нелинейных реактивных элементов; $\dot{x}=dx/dt$; $\mathbf{A}_1=\mathbf{H}_{11}$, $\mathbf{C}_1=\mathbf{H}_{12}$, $\mathbf{B}_1=\mathbf{H}_{13}$ и т. д. — матричные коэффициенты уравнений состояния. Рассматривая токи i_e и напряжения u_J как выходные переменные, приходим к уравнению

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}_3\mathbf{x} + \mathbf{C}_3\mathbf{w}(\mathbf{z}) + \mathbf{B}_3\mathbf{v}.$$

В рассматриваемом случае в отличие от линейных цепей формируются три матричных уравнения; определение коэффициентов этих уравнений сводится (при ограничениях, которые здесь не рассматриваются) к расчету подматриц $\mathbf{H}_{ij}$ гибридной матрицы линейной резистивной части схемы.

Решение приведенных трех матричных уравнений производится следующим образом. Считая, что для момента времени $t_k=kh$ ($k=0, 1, 2\ldots$; h — шаг интегрирования) известен вектор переменных состояния $\mathbf{x}_k=\mathbf{x}(t_k)$, решением алгебраического уравнения

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{A}_2\mathbf{x}_k + \mathbf{C}_2\mathbf{w}_k(\mathbf{z}_k) + \mathbf{B}_2\mathbf{v}_k$$

(методами простой итерации, Ньютона и др.) находим вектор $\mathbf{z}_k=\mathbf{z}(t_k)$. Это позволяет определить вектор $\mathbf{y}_k=\mathbf{y}(t_k)$ и проинтегрировать систему дифференциальных уравнений, приводимую к виду

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{D}(\mathbf{x})]^{-1}[\mathbf{A}_1\mathbf{x} + \mathbf{C}_1\mathbf{w}(\mathbf{z}) + \mathbf{B}_1\mathbf{v}].$$

Эта система интегрируется численными методами (Эйлера и др.) в пределах от $t=t_k$ до $t=t_{k+1}=(k+1)h$ при $\mathbf{w}(\mathbf{z})=\mathbf{w}_k(\mathbf{z}_k)$, что позволяет найти вектор переменных состояния $\mathbf{x}_{k+1}=\mathbf{x}(t_{k+1})$. Далее расчет повторяется аналогично.

Следует отметить, что при ручном составлении рассмотренных уравнений емкости и нелинейные r-ветви заменяются источниками ЭДС, а индуктивности и нелинейные g-ветви—

источниками тока (рис. 4.61, *б*), элементы подматриц $\mathbf{H}_{ij}$ линейной части схемы записываются на основании принципа наложения.

Метод дискретных моделей

Для решения на ЭВМ дифференциальных уравнений можно применить неявные методы интегрирования, обладающие высокой численной устойчивостью, например неявные методы Эйлера и трапеций, описываемые соответственно формулами

$$x_{k+1} = x_k + h\dot{x}_{k+1};$$

$$x_{k+1} = x_k + h(\dot{x}_k + \dot{x}_{k+1})/2.$$

Здесь h — шаг интегрирования; k — индекс временных итераций.

Неявные методы интегрирования позволяют алгебраизировать уравнения индуктивных и емкостных элементов, в результате чего расчет переходных процессов сводится к решению множества систем алгебраических уравнений, описывающих схему в дискретные моменты времени. Например, применяя неявную формулу Эйлера для тока нелинейной индуктивности, получаем

$$i_{L,k+1} = i_{L,k} + h\, di_{L,k+1}/dt,$$

или с учетом равенства $di_L/dt = u_L/L(i_L)$

$$u_{L,k+1} = L(i_{L,k+1})(i_{L,k+1} - i_{L,k})/h.$$

Поскольку зависимость дифференциальной индуктивности от тока $L(i_L)$ известна, приведенная формула определяет напряжение в момент времени t_{k+1} как функцию тока $i_{L,k+1}$ в тот же момент:

$$u_{L,k+1} = F_L(i_{L,k+1}).$$

Эту функцию можно рассматривать как вольт-амперную характеристику резистивного нелинейного элемента, которым в дискретный момент времени t_{k+1} можно заменить нелинейную индуктивность $L(i_L)$.

Аналогично для нелинейной емкости $C(u_C)$ получаем дуальное соотношение:

$$i_{C,k+1} = C(u_{C,k+1})(u_{C,k+1} - u_{C,k})/h,$$

или

$$i_{C,k+1} = F_C(u_{C,k+1}).$$

Это соотношение также можно рассматривать как вольт-амперную характеристику резистивного нелинейного элемента, эквивалентного в дискретный момент времени t_{k+1} емкости $C(u_C)$.

Если вместо метода Эйлера применяется более точный метод трапеций, то изменяются лишь выражения для функций F_L и F_C:

$$F_L(i_{L,k+1}) = \frac{2}{h} L(i_{L,k+1}) \left[i_{L,k+1} - i_{L,k} - \frac{h}{2} \frac{di_{L,k}}{dt} \right];$$

$$F_C(u_{C,k+1}) = \frac{2}{h} C(u_{C,k+1}) \left[u_{C,k+1} - u_{C,k} - \frac{h}{2} \frac{du_{C,k}}{dt} \right].$$

Аналогичные выражения можно получить и для других методов неявного интегрирования.

Резистивные элементы с вольт-амперными характеристиками $u_{L,k+1} = F_L(i_{L,k+1})$, $i_{C,k+1} = F_C(u_{C,k+1})$ называются соответственно дискретными моделями нелинейных индуктивных и емкостных элементов. Заменив в заданной схеме все реактивные элементы их дискретными моделями, получим резистивную дискретную модель этой схемы, описываемую системой нелинейных алгебраических уравнений.

Таким образом, расчет переходных напряжений и токов нелинейной схемы в моменты времени t_{k+1} сводится к расчету множества резистивных нелинейных схем — дискретных моделей. В начальный момент $t=0$ индуктивные и емкостные элементы заменяются источниками тока $i_L(0)$ и напряжения $u_C(0)$, что также приводит к резистивной схеме. Поэтому методы анализа резистивных нелинейных схем (см. § 4.6) служат основой расчета и переходных процессов при помощи дискретных моделей.

Литература [4.1—4.8, 4.13].

4.9. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Закон Кулона

Сила взаимодействия между двумя точечными неподвижными зарядами q_1 и q_2 (точнее, сила, испытываемая вторым зарядом) в однородной среде с относительной диэлектрической проницаемостью ε_r

$$\boldsymbol{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_r \varepsilon_0 R_{12}^2} \mathbf{R}^0,$$

где R_{12} — расстояние между зарядами; $\mathbf{R}^0 = \boldsymbol{R}_{12}/R_{12}$ — единичный вектор, направленный от первого заряда ко второму.

Коэффициент пропорциональности ε_0 — электрическая постоянная — здесь и в дальнейшем зависит от выбора системы единиц и формы записи основных уравнений. В Международной системе СИ и в абсолютной практической рационализованной системе единиц МКСА $\varepsilon_0 \approx 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, в нерационализованной системе СГСЭ и симметричной (гауссовой) $\varepsilon_0 = 1$. Здесь и всюду далее предполагается, что среда имеет одинаковые свойства во всех направлениях (изотропна) и линейна.

Одноименные заряды отталкиваются, разноименные притягиваются.

Напряженность поля. Потенциал

Напряженность поля определяется через силу, действующую в этом поле на заряженную частицу с положительным зарядом q: $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{F}/q$.

По теореме Гаусса для электростатического поля поток вектора $\boldsymbol{E}$ через замкнутую поверхность S равен алгебраической сумме свободных Q и связанных $Q_{\text{связ}}$ зарядов, охватываемых этой поверхностью:

$$\oint \varepsilon_0 \boldsymbol{E} d\boldsymbol{S} = \sum Q + \sum Q_{\text{связ}}.$$

В однородной среде с относительной диэлектрической проницаемостью ε_r

$$\oint \varepsilon_r \varepsilon_0 \boldsymbol{E}\, d\boldsymbol{S} = \Sigma Q.$$

Если в объеме V, ограниченном поверхностью S, распределен объемный заряд с плотностью ρ, поверхностный заряд (на электродах) с плотностью σ, линейный заряд с плотностью τ (например, на проводах линии), то

$$\oint \varepsilon_r \varepsilon_0 \boldsymbol{E} d\boldsymbol{S} = \int \rho\, dV + \int \sigma\, dS + \int \tau\, dl.$$

Напряженность электростатического поля (поля неподвижных зарядов) или поля постоянных токов в проводящей среде (вне источников энергии) может быть представлена как градиент скалярной функции потенциала φ

$$\boldsymbol{E} = -\operatorname{grad}\varphi = -\nabla\varphi.$$

Разность потенциалов между точками M_1 и M_2 электростатического поля или поля постоянных токов в проводящей среде не зависит от пути l:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_{M_1}^{M_2} \boldsymbol{E}\, d\boldsymbol{l} \text{ и } -d\varphi = \boldsymbol{E}\, d\boldsymbol{l};$$

$$\oint \boldsymbol{E}\, d\boldsymbol{l} = 0 \text{ и } \operatorname{rot}\boldsymbol{E} = 0$$

(потенциальное поле).

Уравнение электрической (силовой) линии l поля:

$$\boldsymbol{E} \times d\boldsymbol{l} = 0.$$

Уравнение эквипотенциали:

$$\boldsymbol{E}\, d\boldsymbol{l} = 0.$$

Например, для точечного заряда q или заряженной сферы с суммарным зарядом q поле вне сферы:

$$\boldsymbol{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_r \varepsilon_0 R^2}\mathbf{R}^0; \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 R},$$

где R — расстояние от точечного заряда или центра сферы до точки наблюдения; $R^0 = R/R$ — единичный вектор, направленный из центра в точку наблюдения; потенциал φ принят равным нулю в бесконечно удаленной точке.

Для диполя с зарядами $\pm q$ и плечом l (вектор направлен от $-q$ к $+q$) в сферической системе координат (табл. 4.12) с началом в центре диполя и с отсчетом угла θ от оси, направленной вдоль плеча l:

$$E_R = \frac{2ql\cos\theta}{4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 R^3}; \quad E_\theta = \frac{ql\sin\theta}{4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 R^3};$$

$$E_\alpha = 0;$$

$$\varphi = ql\cos\theta/4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 R^2,$$

где потенциал φ принят равным нулю в бесконечно удаленной точке.

Для одиночного прямолинейного провода — достаточно длинного, чтобы можно было пренебречь влиянием краев, заряженного с линейной плотностью τ (на единицу длины) в цилиндрической системе координат (см. табл. 4.12), ось z которой совпадает с осью провода, поле вне провода

$$E = E_r = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 r}; \quad \varphi = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0}\ln\frac{C}{r},$$

где C — постоянная, зависящая от выбора начала отсчета потенциала.

Для двухпроводной линии с зарядами $\pm\tau$ (на единицу длины), расстоянием между осями проводов d и радиусом проводов $r_0 \ll d$ потенциал вне проводов

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0}\ln\frac{r_-}{r_+},$$

где r_- и r_+ — соответственно расстояния до точки наблюдения от осей отрицательно и положительно заряженных проводов; потенциал φ принят равным нулю в центре между проводами.

Для коаксиального кабеля с зарядом жилы на единицу длины $+\tau$ и оболочки $-\tau$, напряжением между жилой и оболочкой U, радиусом жилы r_1 и внутренним радиусом оболочки r_2 в цилиндрической системе координат (см. табл. 4.12) с осью z, совпадающей с осью кабеля, поле в диэлектрике

$$E = E_r = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 r} = \frac{U}{r\ln(r_2/r_1)};$$

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0}\ln\frac{C}{r},$$

где C — постоянная, зависящая от выбора начала отсчета потенциала.

Поляризованность, смещение

Вектор поляризованности равен объемной плотности электрических моментов диполей (момент в единице объема):

$$\boldsymbol{P} = \lim_{V\to 0}(\Sigma p/V),$$

где $\boldsymbol{p} = q\boldsymbol{l}$ — электрический момент диполя поляризованной среды; q — заряд диполя; l — плечо диполя (направление от отрицательного заряда к положительному).

В случае одинаковых моментов

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{p}n,$$

где n — число диполей в единице объема.

Связанный (в диполях) заряд внутри замкнутой поверхности

$$\Sigma Q_{\text{связ}} = -\oint \mathbf{P}\, d\mathbf{S}.$$

Объемная плотность связанного заряда

$$\rho_{\text{связ}} = -\operatorname{div}\boldsymbol{P}.$$

Вектор электрического смещения D определяется как сумма двух векторов:

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0\boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}.$$

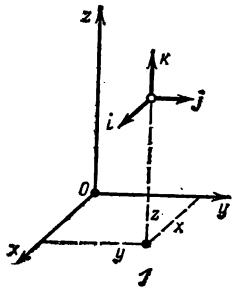
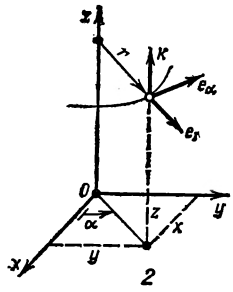
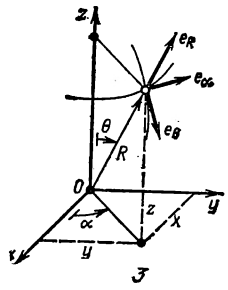
По теореме Гаусса

$$\oint \boldsymbol{D}\, d\boldsymbol{S} = \Sigma Q,$$

где Q — свободные заряды; в частности,

$$Q = \int \rho\, dV + \int \sigma\, dS + \tau\, dl.$$

Таблица 4.12. Декартовы, цилиндрические и сферические координаты. Операции векторного анализа

Декартовы x, y, z	Цилиндрические r, α, z	Сферические R, θ, α
 1	 2	 3
	$x = r\cos\alpha;\quad y = r\sin\alpha;\quad z = z$	$x = R\sin\theta\cdot\cos\alpha;\quad y = R\sin\theta\cdot\sin\alpha;\quad z = R\cos\theta$
Элемент длины		
$d\mathbf{l} = \mathbf{i}\,dx + \mathbf{j}\,dy + \mathbf{k}\,dz$	$d\mathbf{l} = \mathbf{e}_r\,dr + \mathbf{e}_\alpha\, r\,d\alpha + \mathbf{k}\,dz$	$d\mathbf{l} = \mathbf{e}_R dR + \mathbf{e}_\theta R\,d\theta + \mathbf{e}_\alpha R\sin\theta\,d\alpha$

$$\operatorname{grad}\varphi = \nabla\varphi = \mathbf{i}\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \mathbf{j}\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \mathbf{k}\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \mathbf{e}_r\frac{\partial\varphi}{\partial r} + \mathbf{e}_\alpha\frac{1}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial\alpha} + \mathbf{k}\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \mathbf{e}_R\frac{\partial\varphi}{\partial R} + \mathbf{e}_\theta\frac{1}{R}\frac{\partial\varphi}{\partial\theta} + \mathbf{e}_\alpha\frac{1}{R\sin\theta}\frac{\partial\varphi}{\partial\alpha};$$

$$\operatorname{div}\mathbf{F} = \nabla\mathbf{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = \frac{1}{r}\frac{\partial(rF_r)}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial F_\alpha}{\partial\alpha} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = \frac{1}{R^2}\frac{\partial(R^2F_R)}{\partial R} + \frac{1}{R\sin\theta}\frac{\partial(F_\theta\sin\theta)}{\partial\theta} + \frac{1}{R\sin\theta}\frac{\partial F_\alpha}{\partial\alpha};$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{F} = \nabla\times\mathbf{F} = \begin{Vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_x & F_y & F_z \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \mathbf{e}_r/r & \mathbf{e}_\alpha & \mathbf{k}/r \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial\alpha} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_r & rF_\alpha & F_z \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \frac{\mathbf{e}_R}{R^2\sin\theta} & \frac{\mathbf{e}_\theta}{R\sin\theta} & \frac{\mathbf{e}_\alpha}{R} \\ \frac{\partial}{\partial R} & \frac{\partial}{\partial\theta} & \frac{\partial}{\partial\alpha} \\ F_R & RF_\theta & (R\sin\theta)\,F_\alpha \end{Vmatrix};$$

$$\operatorname{div}\operatorname{grad}\varphi = \nabla^2\varphi = \Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial\alpha^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = \frac{1}{R}\frac{\partial^2(R\varphi)}{\partial R^2} + \frac{1}{R^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\varphi}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{R^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2\varphi}{\partial\alpha^2};$$

$$\operatorname{div}\operatorname{rot}\mathbf{F} = \nabla(\nabla\times\mathbf{F}) = 0$$

$$\operatorname{rot}\operatorname{grad}\varphi = \nabla\times\nabla\varphi = 0;$$

$$\operatorname{div}(\mathbf{A}\times\mathbf{B}) = \nabla(\mathbf{A}\times\mathbf{B}) = \mathbf{B}\operatorname{rot}\mathbf{A} - \mathbf{A}\operatorname{rot}\mathbf{B};$$

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\mathbf{F} = \nabla\times(\nabla\times\mathbf{F}) = \operatorname{grad}\operatorname{div}\mathbf{F} - \nabla^2\mathbf{F};$$

$$\oint_S \mathbf{F}\,d\mathbf{S} = \int_V \operatorname{div}\mathbf{F}\,dV;\quad \oint_l \mathbf{F}\,d\mathbf{l} = \int_S \operatorname{rot}\mathbf{F}\,d\mathbf{S}$$

Объемная плотность свободного заряда

$$\rho = \operatorname{div}\mathbf{D}.$$

В линейной среде

$$\boldsymbol{P} = \chi_r\varepsilon_0\boldsymbol{E} = \chi_a\boldsymbol{E} \text{ и } \boldsymbol{D} = (1+\chi_r)\varepsilon_0\boldsymbol{E} = \varepsilon_r\varepsilon_0\boldsymbol{E} = \varepsilon_a\boldsymbol{E},$$

где $\varepsilon_r = 1+\chi_r$ — относительная диэлектрическая проницаемость; χ_r — относительная диэлектрическая восприимчивоеть; χ_a — абсолютная диэлектрическая восприимчивость; ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость.

В нерационализованных системах СГСЭ и симметричной (гауссовой), где $\varepsilon_0 = 1$,

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{E} + 4\pi\boldsymbol{P} = (1 + 4\pi\varkappa_э)\boldsymbol{E} = \varepsilon_r\boldsymbol{E},$$

где $\varepsilon_r = 1 + 4\pi\varkappa_э$ и $\varkappa_э$ — диэлектрическая восприимчивость, которая в 4π раз меньше χ_r. При пользовании таблицами необходимо обратить внимание на то, какое из значений восприимчивости имеется в виду.

Ток, плотность тока

В проводящей среде при постоянном поле с напряженностью $\boldsymbol{E}$ плотность тока (закон Ома в дифференциальной форме)

$$\boldsymbol{J} = \gamma \boldsymbol{E},$$

где γ — удельная проводимость среды.

Ток через поверхность

$$I = \int \boldsymbol{J}\, d\boldsymbol{S}.$$

По закону сохранения заряда

$$\oint \boldsymbol{J}\, d\boldsymbol{S} = 0 \text{ и } \operatorname{div} \boldsymbol{J} = 0.$$

По закону Джоуля—Ленца активная мощность в единице объема

$$p = \boldsymbol{J}\,\boldsymbol{E} = \gamma E^2 = J^2/\gamma.$$

Уравнения Лапласа и Пуассона. Граничные условия

Для каждой точки потенциального поля, например электростатического, справедливо уравнение Пуассона

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = \nabla^2 \varphi = -\rho/\varepsilon_r \varepsilon_0,$$

где φ — потенциал; ρ — свободный объемный заряд в рассматриваемой точке.

Если в рассматриваемой точке плотность свободных объемных зарядов равна нулю, то

$$\nabla^2 \varphi = 0$$

— уравнение Лапласа.

На границе раздела двух диэлектриков (1 и 2)

$$E_{2t} = E_{1t} \text{ или } \varphi_2 = \varphi_1; \quad D_{2n} = D_{1n};$$
$$P_{2n} - P_{1n} = -\sigma_{\text{связ}},$$

где принято, что нормаль n направлена из первой среды во вторую.

На границе раздела проводника (1) и диэлектрика (2) в электростатическом поле (поля в проводнике нет)

$$E_{2t} = E_{1t} = 0 \text{ или } \varphi_2 = \varphi_1; \quad D_{2n} = \sigma;$$
$$E_{1n} = 0; \quad P_{2n} = -\sigma_{\text{связ}}; \quad P_{1n} = 0.$$

На границе раздела проводника (1) и диэлектрика (2) в поле постоянного тока

$$E_{2t} = E_{1t} = J_{1t}/\gamma \text{ или } \varphi_2 = \varphi_1; \quad J_{2t} = 0;$$
$$J_{2n} = J_{1n} = 0; \quad D_{2n} = \sigma; \quad E_{1n} = 0;$$
$$P_{2n} = -\sigma_{\text{связ}}; \quad P_{1n} = 0.$$

На границе раздела двух проводников (*1* и *2*) в поле постоянного тока

$$E_{2t} = E_{1t} \text{ или } \varphi_2 = \varphi_1; \quad J_{2n} = J_{1n}.$$

Здесь D_n, E_n, P_n, J_n — нормальные составляющие векторов; E_t, J_t — тангенциальные составляющие векторов; σ и $\sigma_{\text{связ}}$ — поверхностные плотности свободного и связанного зарядов. Нормаль к границе раздела направлена из среды 1 в среду 2.

Распределение потенциала в системе проводящих заряженных тел

Потенциал любого из n тел φ_k линейно зависит от зарядов Q_i каждого из тел:

$$\varphi_1 = \alpha_{11} Q_1 + \alpha_{12} Q_2 + \ldots + \alpha_{1n} Q_n;$$

. . . . . .

$$\varphi_n = \alpha_{n1} Q_1 + \alpha_{n2} Q_2 + \ldots + \alpha_{nn} Q_n,$$

где α_{ki} — потенциальные коэффициенты; $\alpha_{ki} = \alpha_{ik}$ при $k \neq i$.

Система уравнений может быть решена относительно зарядов:

$$Q_1 = \beta_{11} \varphi_1 + \beta_{12} \varphi_2 + \ldots + \beta_{1n} \varphi_n;$$

. . . . . .

$$Q_n = \beta_{n1} \varphi_1 + \beta_{n2} \varphi_2 + \ldots + \beta_{nn} \varphi_n,$$

где β_{ik} — емкостные коэффициенты; $\beta_{ik} = \beta_{ki}$ при $i \neq k$.

Пример (рис. 4.62). Трехпроводная линия над землей. Влияние земли заменяется зеркальным отображением:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0 l} \ln \frac{2h_{ii}}{r}; \quad \alpha_{ik} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0 l} \ln \frac{D_{ki}}{d_{ki}},$$

где l — длина линии; h_{ii} — высота подвеса i-го провода; r — радиус провода; D_{ki} — расстояние между центром k-го провода и центром зеркального отображения i-го провода; d_{ki} — расстояние между центрами k-го и i-го проводов; при вычислении α предполагается $r \ll d$ и $r \ll h$;

$$\beta_{11} = \frac{\alpha_{22}\alpha_{33} - \alpha_{23}^2}{\Delta}; \quad \beta_{12} = \beta_{21} = \frac{\alpha_{23}\alpha_{31} - \alpha_{21}\alpha_{33}}{\Delta};$$

$$\Delta = \begin{Vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{Vmatrix}.$$

Остальные коэффициенты β можно записать, применив круговую замену индексов, причем $\beta_{ii} > 0$ и $\beta_{ki} < 0$.

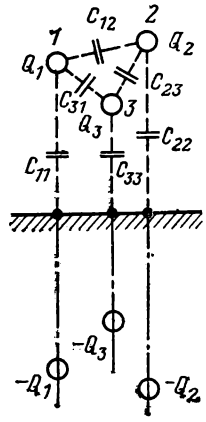


Рис. 4.62

Емкость

В случае двух проводников, несущих равные и противоположные по знаку заряды $Q_1 = -Q_2 = Q$:

$$\varphi_1 = (\alpha_{11} - \alpha_{12})\, Q; \quad \varphi_2 = (\alpha_{21} - \alpha_{22})\, Q$$

и

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = (\alpha_{11} + \alpha_{22} - 2\alpha_{12})\, Q.$$

Емкость между двумя проводниками

$$C = Q/U_{12}.$$

Если второй проводник удален в бесконечность и $\varphi_2 = 0$, то емкость уединенного проводника

$$C = Q/\varphi_1.$$

Частичные емкости

Линейная зависимость зарядов проводников от потенциала может быть записана в виде

$$Q_1 = C_{11}\varphi_1 + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + \ldots$$
$$\ldots + C_{1n}(\varphi_1 - \varphi_n);$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$Q_n = C_{nn}\varphi_n + C_{n1}(\varphi_n - \varphi_1) + \ldots$$
$$\ldots + C_{n,n-1}(\varphi_n - \varphi_{n-1}),$$

где частичные емкости (см. рис. 4.62)

$$C_{ii} = \beta_{i1} + \beta_{i2} + \ldots + \beta_{ii} + \ldots + \beta_{in};$$
$$C_{ik} = C_{ki} = -\beta_{ki}.$$

Моделирование

Аналогия уравнений электростатического поля при $\rho = 0$ и постоянного поля в проводящей среде вне источников энергии позволяет моделировать электростатические поля, подчиняющиеся уравнению Лапласа, полями в проводящей среде, если проводимость среды γ много меньше проводимости материала электродов (см. также «Метод электростатической аналогии»).

Энергия электростатического поля. Силы

Энергия

$$W = \frac{1}{2}\sum_k \varphi_k Q_k + \frac{1}{2}\int \rho\varphi\, dV,$$

где φ_k и Q_k — потенциалы и заряды электродов (проводников); ρ — объемная плотность свободного заряда между электродами.

Энергия конденсатора

$$W = CU^2/2 = QU/2 = Q^2/2C.$$

Объемная плотность энергии поля (для которого $D = \varepsilon_r\varepsilon_0 E$)

$$w = DE/2 = \varepsilon_s\varepsilon_0 E^2/2 = D^2/2\varepsilon_r\varepsilon_0.$$

Составляющая механической силы по координате g (стремящаяся изменить данную координату g проводника)

$$F = -(\partial W/\partial g)_{Q=\text{const}}; \quad F = (\partial W/\partial g)_{\varphi=\text{const}}.$$

Первая из формул применяется, если при изменении энергии поля остаются постоянными заряды всех проводников (например, когда все проводники изолированы и отсоединены от источников питания). Вторая формула применяется, если остаются постоянными потенциалы всех проводников (например, потенциалы всех проводников заданы присоединенным источником питания).

Литература [4.1, 4.2, 4.4—4.6, 4.60—4.63].

4.10. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитная индукция и магнитный поток

Сила испытываемая в магнитном поле движущимся зарядом q (сила Лоренца) или элементом проводника $d\boldsymbol{l}$ с током i (сила Ампера), определяется вектором магнитной индукции $\boldsymbol{B}$;

$$\boldsymbol{F} = qc \times \boldsymbol{B} \text{ и } d\boldsymbol{F} = i\, d\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B},$$

где c — скорость движения заряда.

Составляющая магнитной индукции, создаваемой элементом тока $I\ d\boldsymbol{l}$ на расстоянии r от элемента тока в однородной среде с относительной магнитной проницаемостью μ_r, по закону Био—Савара

$$d\boldsymbol{B} = \frac{\mu_r\mu_0}{4\pi}\frac{I\, d\boldsymbol{l} \times r^0}{r^2},$$

где $r^0 = r/r$—единичный вектор, направленный от элемента тока в данную точку.

Коэффициент пропорциональности μ_0 — магнитная постоянная — здесь и в дальнейшем зависит от выбора системы единиц и формы записи уравнений. В Международной системе СИ и рационализованной системе МКСА постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ Гн/м, в нерационализованных системах СГСМ и симметричной (гауссовой) $\mu_0 = 1$.

Магнитная индукция, создаваемая контуром с током I,

$$B = \frac{\mu_r\mu_0}{4\pi} I \oint \frac{d\boldsymbol{l} \times r^0}{r^2}.$$

Например, для круглого витка радиусом a с током I индукция на оси

$$B = B_z = \frac{\mu_r\mu_0 I}{2}\frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}},$$

где z — расстояние от центра витка.

Для прямолинейного провода радиусом r_0 с постоянной плотностью тока J в цилиндрической системе координат с осью z, совпадающей с осью провода, индукция внутри (1) и вне (2) провода

$$B_1 = B_{1\alpha} = \mu_{r1}\mu_0 Jr/2;$$

$$B_2 = B_{2\alpha} = \mu_{r2}\mu_0 Jr_0^2/2r,$$

где r — расстояние от оси провода.

Магнитный поток через поверхность

$$\Phi = \int \boldsymbol{B}\, d\boldsymbol{S}.$$

Для замкнутой поверхности

$$\oint B\,dS = 0, \text{ т. е. } \operatorname{div} B = 0.$$

Намагниченность. Напряженность магнитного поля

Вектор намагниченности

$$M = \lim_{V\to 0} \frac{\Sigma \mathbf{m}}{V}; \quad \operatorname{rot} M = J_{\text{связ}},$$

где Σm — сумма магнитных моментов в элементарном объеме V; $J_{\text{связ}}$ — плотность токов, обусловливающих магнитный момент вещества (магнетика) и его намагниченность.

Вектор напряженности

$$H = B/\mu_0 - M.$$

В неферромагнетике $M = \varkappa H$;

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (1 + \varkappa) H =$$

$$= \mu_r \mu_0 H = \mu_a H,$$

где $\mu_r = 1 + \varkappa$ — относительная магнитная проницаемость; $\varkappa$ — относительная магнитная восприимчивость; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость.

В нерационализованных системах СГСМ и симметричной (гауссовой) ($\mu_0 = 1$)

$$B = H + 4\pi M = (1 + 4\pi k) H = \mu_r H,$$

где $\mu_r = 1 + 4k$ (см. замечание о диэлектрической восприимчивости).

Закон полного тока

$$\oint B\,dl = \mu_0 \int (J + J_{\text{связ}})\,dS;$$

$$\operatorname{rot} B = \mu_0 (J + J_{\text{связ}}),$$

где J — плотность тока проводимости; l — контур, ограничивающий поверхность S.

Закон полного тока, выраженный через напряженность H, позволяет не учитывать в явной форме связанных токов:

$$\oint H\,dl = \int J\,dS \text{ и } \operatorname{rot} H = J.$$

Для линейных токов

$$\oint H\,dl = \Sigma I,$$

где ΣI — алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром.

Потенциалы магнитного поля. Граничные условия

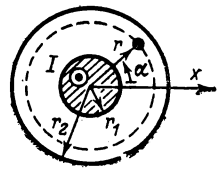
В магнитном поле, для которого $\oint H dl = 0$ и $\operatorname{rot} H = 0$ (потенциальное поле), по аналогии с электростатическим полем можно принять

$$H = -\operatorname{grad} \varphi_{\text{м}} = -\nabla \varphi_{\text{м}}.$$

Например, скалярный магнитный потенциал $\varphi_{\text{м}}$ можно применить к расчету искажений заданного магнитного поля при внесении в него ферромагнитного тела.

Если в магнитном поле $\operatorname{rot} H = 0$, но $\oint H dl \neq 0$ (соленоидальное поле), то можно ввести скалярный потенциал $H = -\operatorname{grad} \varphi_{\text{м}}$, но разность потенциалов неоднозначна.

Рис. 4.63



Пример. Для коаксиального волновода (кабеля) (рис. 4.63) в области $r_1 < r < r_2$ плотность тока равна нулю, т. е. $\operatorname{rot} H = 0$. Но значение $\oint H\,dl$ зависит от выбранного замкнутого контура. Если контур охватывает жилу n раз, то $\oint H\,dl = nI$. Поэтому разность потенциалов неоднозначна. Чтобы получить однозначность, надо ввести перегородку, устраняющую пути, которые охватывают токи. Для волновода, введя перегородку $\alpha = 0$ и выбрав $\varphi_{\text{м}} = 0$ при $\alpha = 0$, получим $\varphi_{\text{м}} = -I\alpha/2\pi$. Неоднозначность потенциала не сказывается на значении градиента потенциала:

$$H = H_\alpha = I/2\pi r.$$

В области, где $\operatorname{rot} H \neq 0$ (вихревое поле), скалярный потенциал не может быть введен.

В любой области можно ввести векторный магнитный потенциал A:

$$\operatorname{rot} A = B \text{ и } \oint A\,dl = \Phi.$$

Величина $\operatorname{div} A$ не влияет на индукцию B и выбирается произвольно, но так, чтобы уравнения, содержащие A, упрощались. Так, для однородной среды при $\operatorname{div} A = 0$ векторный потенциал удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\nabla^2 A = -\mu_r \mu_0 J$$

и для точек поля, где отсутствует плотность тока проводимости, уравнению Лапласа

$$\nabla^2 A = 0.$$

Пример. Для двухпроводной линии с током I вне проводов векторный потенциал

$$A = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{r_-}{r_+},$$

где r_- и r_+ — соответственно расстояния до точки наблюдения от 1-го и 2-го проводов; потенциал A принят равным нулю в центре между проводами.

На границе раздела двух сред (*1* и *2*) $B_{2n} = B_{1n}$ или $A_{2t} = A_{1t}$ и $H_{2t} = H_{1t}$, где B_n — нормальная составляющая вектора индукции; A_t и H_t — тангенциальные составляющие векторного потенциала и вектора напряженности.

Энергия. Электродинамические силы

Энергия системы контуров (катушек) с токами

$$W = \frac{1}{2} \sum i_k \Psi_k,$$

где Ψ_k — потокосцепление k-го контура; i_k — ток k-го контура.

Для двух контуров

$$W = L_1 i_1^2/2 + L_2 i_2^2/2 \pm M i_1 i_2,$$

$+M$ — при «согласном» включении, $-M$ — при «встречном» включении.

Объемная плотность энергии поля (если $B = \mu_r \mu_0 H$)

$$w = BH/2 = \mu_r \mu_0 H^2/2 = B^2/2\mu_r \mu_0.$$

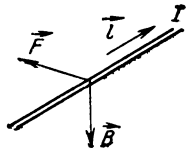


Рис. 4.64

Сила, действующая на провод длиной l с током I (рис. 4.64),

$$\boldsymbol{F} = I\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}.$$

Сила взаимодействия двух достаточно длинных параллельных проводов ($l_1 = l_2 = l$)

$$F = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi a} I_1 I_2 l,$$

где a — расстояние между проводами.

Два провода притягиваются, когда токи в них имеют одинаковые направления, и отталкиваются, когда направления токов противоположны.

Сила, стремящаяся изменить данную координату g системы контуров,

$$F = -(\partial W/\partial g)_{\Psi=\text{const}}; \quad F = (\partial w/\partial g)_{i=\text{const}}$$

(см. примечание к вычислению силы в электростатическом поле).

Электромагнитная индукция (наведение ЭДС)

Если провод движется в магнитном поле $\boldsymbol{B}$ со скоростью $\boldsymbol{v}$, то в каждом элементе $d\boldsymbol{l}$ провода ЭДС

$$de = \boldsymbol{B}(d\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{v}).$$

Если провод l движется в однородном магнитном поле перпендикулярно векторам $\boldsymbol{B}$ и $\boldsymbol{l}$, то $e = Blv$.

Для замкнутого контура

$$e = \oint \boldsymbol{E}\, d\boldsymbol{l} = \oint (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})\, d\boldsymbol{l} = -d\Phi/dt.$$

Такая же ЭДС индуцируется в неподвижном контуре l при изменении магнитного потока, пронизывающего контур. Если контур состоит из w витков (катушка), каждый из которых пронизывается одним и тем же потоком Φ, то наводимая ЭДС в w раз больше.

Если не все витки охватываются одним и тем же потоком, то $e = -d\Psi/dt$, причем потокосцепление

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \ldots + \Phi_k + \ldots + \Phi_w,$$

где Φ_k — поток, пронизывающий k-й виток.

Если одновременно изменяется магнитный поток и перемещается контур, то

$$e = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}\frac{dx}{dt} - \frac{\partial \Psi}{\partial t}.$$

Самоиндукция и взаимная индукция

В простейшем случае одного контура с током в неферромагнитной среде магнитный поток, сцепляющийся с этим контуром, определяется только током в этом контуре:

$$\Psi_L = Li,$$

где L — индуктивность контура, которая зависит от размеров и формы контура, а также магнитных свойств окружающей среды. При изменении потокосцепления Ψ_L в контуре возникает ЭДС самоиндукции

$$e_L = -d\Psi_L/dt = -L\, di/dt.$$

В случае двух контуров с изменяющимися токами в каждом из них наводится кроме ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции. Например, потокосцепление со вторым контуром

$$\Psi_2 = \Psi_{2L} \pm \Psi_{2M} = L_2 i_2 \pm M_{21} i_1,$$

где M_{21} — взаимная индуктивность между вторым и первым контурами:

$$M_{21} = M_{12} = M.$$

Кроме ЭДС $e_{2L} = -d\Psi_{2L}/dt$ во втором контуре возникает ЭДС взаимной индукции

$$e_{2M} = -d\Psi_{2M}/dt = -M\, di_1/dt.$$

Зависимость между M, L_1 и L_2 определяется коэффициентом связи $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$, причем $k \leqslant 1$.

Закон Ленца: ЭДС, наводимая в контуре изменяющимся магнитным потоком, всегда стремится вызвать ток, направленный так, чтобы воспрепятствовать изменению магнитного потока.

Литература [4.1, 4.2, 4.4—4.6, 4.60—4.62].

4.11. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в неподвижной среде

Вихри поля:

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{H} = \gamma \boldsymbol{E} + \partial \boldsymbol{D}/\partial t = \boldsymbol{J}_{\text{полн}}$$

(закон полного тока);

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{E} = -\partial \boldsymbol{B}/\partial t$$

(закон электромагнитной индукции).

Здесь $\gamma \boldsymbol{E} = \boldsymbol{J}$ — плотность тока проводимости; $\partial \boldsymbol{D}/\partial t = \boldsymbol{J}_{\text{см}}$ — плотность тока смещения; γ — удельная проводимость среды; $\boldsymbol{J}_{\text{полн}}$ — плотность полного тока.

Истоки поля:

$$\operatorname{div} \boldsymbol{B} = 0 \text{ и } \operatorname{div} \boldsymbol{D} = \rho,$$

причем $\boldsymbol{B} = \mu_0(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M})$; $\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}$ и по закону сохранения заряда

$$\operatorname{div} \boldsymbol{J} = -\partial \rho/\partial t.$$

Для линейной изотропной среды

$$\boldsymbol{B} = \mu_r \mu_0 \boldsymbol{H}; \quad \boldsymbol{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \boldsymbol{E}; \quad \operatorname{rot} \boldsymbol{H} = \gamma \boldsymbol{E} + \varepsilon_r \varepsilon_0 \partial \boldsymbol{E}/\partial t; \quad \operatorname{rot} \boldsymbol{E} = -\mu_r \mu_0 \partial \boldsymbol{H}/\partial t.$$

Граничные условия

На границе двух сред (1 и 2)

$$B_{2n} = B_{1n}; \quad H_{2t} = H_{1t}; \quad E_{2t} = E_{1t};$$

$$D_{2n} - D_{1n} = \sigma; \quad J_{2n\text{полн}} = J_{1n\text{полн}}.$$

Потенциалы

Скалярный (электрический) φ и векторный (магнитный) A потенциалы электромагнитного поля определяются уравнениями:

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{A} = \boldsymbol{B} \text{ и } -\operatorname{grad}\varphi = \boldsymbol{E} + \partial \boldsymbol{A}/\partial t.$$

Если выбрать уравнение связи

$$\operatorname{div} A = -\frac{1}{c^2}\frac{\partial \varphi}{\partial t},$$

где $c = 1/\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0}$, то для векторного и скалярного потенциалов получаются волновые уравнения:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \nabla^2 A = \mu_r \mu_0 \boldsymbol{J};$$

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \nabla^2 \varphi = \frac{\rho}{\varepsilon_r \varepsilon_0}.$$

В этих уравнениях плотность тока $\boldsymbol{J}$ и заряд ρ связаны законом сохранения заряда, т. е. не могут задаваться независимо. После решения одного из уравнений при заданных граничных условиях вторая величина определяется из уравнения связи.

Магнитная индукция и напряженность электрического поля находятся после выполнения простых операций:

$$\boldsymbol{B} = \operatorname{rot} \boldsymbol{A} \text{ и } \boldsymbol{E} = -\partial \boldsymbol{A}/\partial t - \operatorname{grad}\varphi.$$

Уравнения Максвелла в комплексной форме

Когда электромагнитное поле изменяется синусоидально, уравнения Максвелла могут быть записаны в комплексной форме:

$$\operatorname{rot} \underline{\boldsymbol{H}} = \gamma \underline{\boldsymbol{E}} + j\omega\varepsilon_r \varepsilon_0 \underline{\boldsymbol{E}};$$

$$\operatorname{rot} \underline{\boldsymbol{E}} = -j\omega\mu_r \mu_0 \underline{\boldsymbol{H}};$$

$$\operatorname{div} \underline{\boldsymbol{B}} = 0; \quad \operatorname{div} \underline{\boldsymbol{D}} = \underline{\rho}.$$

Определение потерь. Теорема Умова — Пойнтинга

Потери в среде объемом V с удельной проводимостью γ по закону Джоуля—Ленца

$$P = \int \boldsymbol{J}\,\boldsymbol{E}\,dV = \int \gamma E^2\,dV.$$

Во многих случаях потери проще вычисляются по теореме Умова—Пойнтинга

$$-\oint (\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H})\,d\boldsymbol{S} = P + (\partial W_э/\partial t + \partial W_м/\partial t),$$

где $\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H} = \vec{\Pi}$ — вектор Пойнтинга, равный численно потоку электромагнитной энергии, проходящей через единичную поверхность в 1 с (мощность). Левая часть равенства — поток мощности, входящий в объем V, ограниченный поверхностью S. Второе слагаемое правой части — изменение энергии электрического и магнитного полей в объеме V.

В комплексной форме

$$\vec{\underline{\Pi}} = \frac{1}{2}\underline{\boldsymbol{E}}_m \times \underline{\boldsymbol{H}}_m^*,$$

где $\underline{E}_m$, $\underline{H}_m$ — комплексные амплитуды напряженностей, и

$$-\oint \vec{\underline{\Pi}}\,d\underline{\boldsymbol{S}} = P + j\omega \int \left(\frac{\mu_r \mu_0 H_m^2}{2} - \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 E_m^2}{2} \right) dV;$$

здесь P — действительная часть потока вектора Пойнтинга.

Литература [4.1, 4.2, 4.4—4.6, 4.60, 4.61, 4.64—4.67].

4.12. СОПРОТИВЛЕНИЕ, ЕМКОСТЬ ИНДУКТИВНОСТЬ

Сопротивление проводника

Сопротивление проводника, Ом, имеющего постоянное сечение S, м^2, длиной l, м,

$$r = l/\gamma S,$$

где γ — удельная проводимость, См/м.

Емкости конденсаторов и проводов

Емкость плоского конденсатора, Ф, состоящего из n пластин,

$$C = (n-1)\varepsilon_r \varepsilon_0 S/d,$$

где S — площадь пластины, м^2; d — расстояние между пластинами, м; $\varepsilon_0 \approx (1/4\pi)\cdot 9\cdot 10^9$ Ф/м.

Емкость цилиндрического конденсатора, Ф (коаксиального кабеля),

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_r \varepsilon_0 l}{\ln (R_2/R_1)},$$

где l — длина конденсатора, м; R_1 — радиус внутреннего электрода (жилы); R_2 — радиус внешней обкладки (внутренний радиус оболочки); ε_0 — в Ф/м.

Емкости конденсаторов с многослойным диэлектриком, Ф, плоского C_1, цилиндрического C_2:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 S}{\sum_{k=1}^{n} d_k/\varepsilon_{rk}};$$

$$C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_0 l}{\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{\varepsilon_{rk}} \ln \frac{R_k}{R_{k-1}}},$$

где S — площадь пластины, м^2; d_k — толщина k-го слоя диэлектрика, м; ε_{rk} — относительная диэлектрическая проницаемость k-го слоя; n — число слоев; l — длина конденсатора, м; R_0 — радиус внутреннего электрода; R_1, R_2, ...

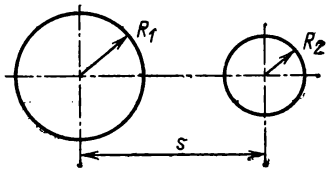


Рис. 4.65

..., R_{n-1} — радиусы граничных поверхностей между слоями; R_n — радиус внешней обкладки; ε_0 — в Ф/м; $k=1, 2, ..., n$.

Емкость двух параллельных цилиндров на единицу длины, Ф/м (рис. 4.65)

$$\text{где } C_0 = 2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 / \ln\frac{k_1}{k_2},$$

$$k_1 = \frac{a + x_1 - R_1}{a + R_1 - x_1}; \quad k_2 = \frac{a + R_2 - x_2}{a + x_2 - R_2};$$

$$x_1 = \frac{s^2 + R_1^2 - R_2^2}{2s};$$

$$x_2 = \frac{s^2 + R_2^2 - R_1^2}{2s}; \quad a = \sqrt{x_1^2 - R_1^2} = \sqrt{x_2^2 - R_2^2}.$$

Емкость прямолинейного провода конечной длины и круглого сечения, Ф (считая, что второй электрод в бесконечности),

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-9} l}{18\left[\ln\frac{l}{r} - 0{,}307 - 0{,}1775/\ln\frac{l}{r} - 0{,}552/\left(\ln\frac{l}{r}\right)^2\right]}$$

с погрешностью менее 1 % при $l/r>10$; здесь l — длина провода, м; r — радиус поперечного сечения, м.

Если допустима меньшая точность, то можно принять

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-9} l}{18\left[\ln(2l/r) - 1\right]}.$$

Примечание. Емкость уединенного проводника равна отношению заряда проводника к его потенциалу в предположении, что все другие проводники бесконечно удалены.

Емкость кольца, Ф (рис. 4.66; считая, что второй электрод в бесконечности),

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-9} \pi R}{9 \ln(8R/r_0)}$$

с погрешностью менее 2 % при $R/r_0>10$; здесь R — радиус кольца, м; r_0 — радиус провода, м.

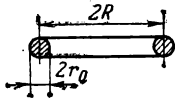


Рис. 4.66

Метод электростатической аналогии

Сопротивление между электродами в проводящей среде рассчитывается методом электростатической аналогии по формулам емкости между теми же электродами, помещенными в диэлектрическую среду:

$$r = \varepsilon_r\varepsilon_0/\gamma C,$$

где r — в Ом; C — емкость между электродами, Ф; γ — удельная проводимость среды, См/м; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ε_0 — в Ф/м.

Пример. При известной емкости цилиндрического конденсатора сопротивление (в омах) между цилиндрическими коаксиальными электродами, помещенными в среду с проводимостью γ, рассчитывается по формуле

$$r = \frac{\ln(R_2/R_1)}{2\pi\gamma l}.$$

Индуктивность и взаимная индуктивность проводов

Индуктивность уединенного прямолинейного провода круглого сечения, Гн,

$$L = 2\cdot 10^{-7} l\left(\ln\frac{2l}{r} - 0{,}75\right),$$

где l — длина провода, м; r — радиус поперечного сечения, м.

Для коротких проводов L, Гн:

$$L = 2\cdot 10^{-7} l\left(\ln\frac{2l}{r} - \frac{3}{4} + \frac{128r}{45\pi l} - \frac{r^2}{4l^2}\right).$$

Взаимная индуктивность, Гн, *двух прямолинейных проводов* одинаковой длины l (рис. 4.67)

$$M = 2\pi\cdot 10^{-7} lk,$$

где l — в м; k — коэффициент (рис. 4.68).

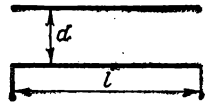


Рис. 4.67

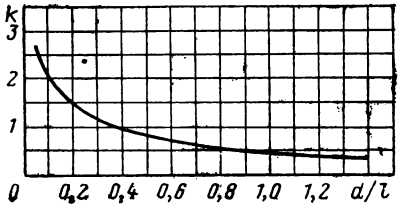


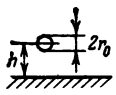
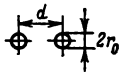
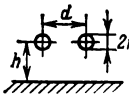
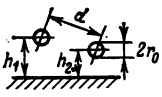
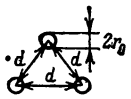
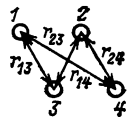
Рис. 4.68

Индуктивность катушек

Индуктивность кольца, Гн (рис. 4.66) при $R \gg r_0$

$$L = 4\pi\cdot 10^{-7} R\left(\ln\frac{8R}{r_0} - 1{,}75\right).$$

Таблица 4.13. **Емкость, индуктивность и взаимная индуктивность воздушных линий**

Схема	C_0, Ф/км	L_0, Гн/км
	$\dfrac{10^{-6}}{18\ln(2h/r_0)}$	$0{,}2\left(\ln\dfrac{2h}{r_0}+0{,}25\right)10^{-3}$
	$\dfrac{10^{-6}}{36\ln(d/r_0)}$	$0{,}4\left(\ln\dfrac{d}{r_0}+0{,}25\right)10^{-3}$
	$\dfrac{10^{-6}}{9\ln\dfrac{(2h/r_0)^2}{1+(2h/d)^2}}$	$0{,}4\left(\ln\dfrac{d}{r_0}+0{,}25\right)10^{-3}-$ $-2\ln(1+d^2/4h^2)\,10^{-4}$
	$\dfrac{10^{-6}}{36\ln\left[\dfrac{d}{r_0}\sqrt{\dfrac{4h_1h_2}{4h_1h_2+d^2}}\right]}$	$0{,}4\left(\ln\dfrac{d}{r_0}+0{,}25\right)10^{-3}$ при $d \ll h_1$ и h_2
	Емкость на фазу $\dfrac{10^{-6}}{18\ln(d/r_0)}$	Индуктивность на фазу $0{,}2\left(\ln\dfrac{d}{r_0}+0{,}25\right)10^{-3}$
	*1, 2* — первая линия; *3, 4* — вторая линия. Взаимная индуктивность: $0{,}2\cdot10^{-3}\ln\dfrac{r_{23}r_{14}}{r_{13}r_{24}}$ $\dfrac{\text{Гн}}{\text{км}}$.	

При произвольном расположении проводов трехфазной линии с учетом земли емкость на фазу

$$\frac{10^{-6}}{18\ln(2hd/r_0D)},$$

где h, d и D — среднегеометрические значения высоты подвеса, расстояния между проводами и расстояния между одним проводом и зеркальным изображением другого:

$$h=\sqrt[3]{h_1h_2h_3}\ ;\ d=\sqrt[3]{d_{12}d_{23}d_{31}}\ ;\ D=\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}};$$

Индуктивность на фазу при $d \ll h$

$$2\cdot10^{-4}\left(\ln\frac{d}{r_0}+0{,}25\right).$$

В общем случае

$$L=4\pi\cdot10^{-7}R\left[\ln\frac{8R}{r_0}-1{,}75+\frac{r_0^2}{8R^2}\times\left(\ln\frac{8R}{r_0}+\frac{1}{3}\right)\right],$$

где R и r_0 — в м; L — в Гн.

Индуктивность кругового кольца прямоугольного сечения, Гн (рис. 4.69)

$$L=4\pi\cdot10^{-7}R\left(\ln\frac{8R}{a+r}-0{,}5\right),$$

где R, a и r — в м.

Индуктивность плоской (дисковой) катушки, Гн (рис. 4.70),

$$L=0{,}5\cdot10^{-7}w^2kd,$$

где w — число витков катушки; d — средний диаметр м; k — коэффициент (рис. 4.71).

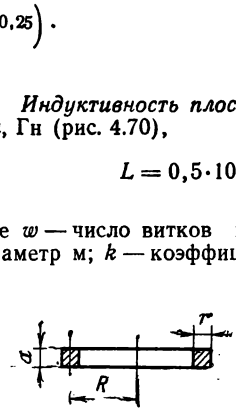


Рис. 4.69

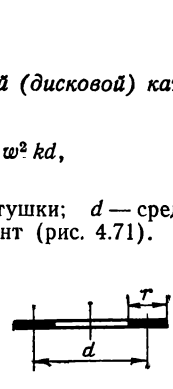


Рис. 4.70

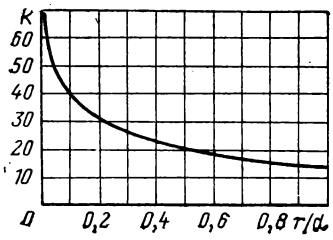


Рис. 4.71

Индуктивность соленоида (бесконечно тонкой катушки) и *однослойной катушки*, Гн (рис. 4.72, *а*),

$$L = 2 \cdot 10^{-7} w^2 kR,$$

где w — число витков катушки; k — коэффициент (рис. 4.72, *б*); l и R — в м.

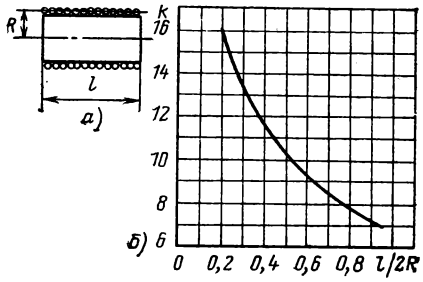


Рис. 4.72

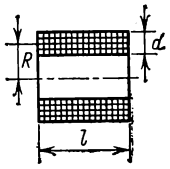


Рис. 4.73

Если $l \geqslant 10R$, то с погрешностью не более 5 %

$$L = \frac{2Rw^2 \cdot 10^{-6}}{0{,}44 + l/2R}.$$

Индуктивность многослойной катушки, Гн (рис. 4.73),

$$L = \frac{0{,}32 \cdot 10^{-4} R^2 w^2}{6R + 9l + 10d},$$

где толщина намотки d, R и l — в м; w — число витков катушки.

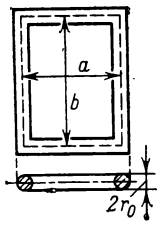


Рис. 4.74

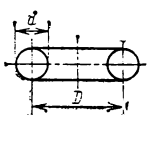


Рис. 4.75

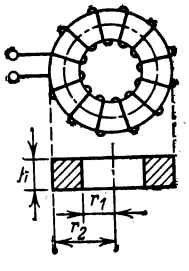


Рис. 4.76

Если в знаменателе слагаемые одного порядка, то ошибка, даваемая формулой, не более 1 %.

Индуктивность прямоугольной рамки, Гн (рис. 4.74),

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \left[a \ln \frac{2ab}{r_0 (a + d)} + b \ln \frac{2ab}{r_0 (b + d)} + 2d - 1{,}75 (a + b) \right],$$

где $d = \sqrt{a^2 + b^2}$; $a \gg r_0$ и $b \gg r_0$;

все размеры в метрах.

Индуктивность тороида, Гн (рис. 4.75), с магнитопроводом круглого сечения из неферромагнитного материала

$$L = \frac{2\pi \cdot 10^{-7} w^2 d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}},$$

где D — средний диаметр тороида и d — диаметр витков, м; w — число витков; если обмотка неоднослойная, то предполагается, что размеры всех витков практически одинаковы.

Индуктивность тороида, Гн (рис. 4.76), с сердечником прямоугольного сечения из неферромагнитного материала

$$L = 2 \cdot 10^{-7} w^2 h \ln (r_2/r_1).$$

где h — в м; w — число витков; если обмотка неоднослойная, то предполагается, что размеры всех витков практически одинаковы.

Взаимная индуктивность, Гн, *двух катушек* с числами витков w_1, w_2 и с общим сердечником круглого сечения из неферромагнитного материала (рис. 4.75)

$$M = 2\pi \cdot 10^{-7} w_1 w_2 \frac{d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}},$$

где D — средний диаметр магнитопровода и d — диаметр витков, м; предполагается, что размеры всех витков практически одинаковы.

Взаимная индуктивность, Гн, *двух катушек* с числами витков w_1, w_2 и с общим сердечником прямоугольного сечения из неферромагнитного материала (рис. 4.76)

$$M = 2 \cdot 10^{-7} w_1 w_2 h \ln (r_2/r_1),$$

где h, r_1 и r_2 — в м; предполагается, что размеры всех витков практически одинаковы.

Индуктивность коаксиального кабеля

При малой толщине оболочки, Гн,

$$L = 2 \cdot 10^{-7} l [\ln (R_2/R_1) + 0{,}25],$$

где l — длина кабеля, м; R_1 — радиус сечения внутреннего электрода (жилы); R_2 — внутренний радиус оболочки.

Примечание. Во всех формулах для индуктивности предполагается, что провод сделан из неферромагнитного материала, частота низкая (поверхностный эффект можно не учитывать).

Литература [4.68—4.70]

Список литературы

Основная литература

4.1. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1984. 559 с. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Высшая школа, 1978. 231 с.

4.2. **Нейман Л. Р., Демирчян К. С.** Теоретические основы электротехники, т. 1. Л.: Энергоиздат, 1981. 536 с. **Нейман Л. Р., Демирчян К. С.** Теоретические основы электротехники, т. 2. Л.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

4.3. **Основы** теории цепей/Г. В. Зевеке. П. А. Ионкин. А. В. Нетушил, С. В. Страхов. М.: Энергия, 1975. 752 с.

4.4. **Теоретические** основы электротехники, Т. 1. Поливанов К. М. М.: Энергия, 1972. 239 с. Т. 2. Жуховицкий Б. Я., Негневицкий И. Б. М.: Энергия, 1972. 200 с. Т. 3. Поливанов К. М. М.: Энергия, 1975. 208 с.

4.5. **Теоретические** основы электротехники/Под ред. П. А. Ионкина. Т. I. Основы теории линейных цепей. М.: Высшая школа, 1976. 544 с. Т. II. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля. М.: Высшая школа, 1976. 383 с.

4.6. **Теоретические** основы электротехники. В 3-х ч. Ч. I. Атабеков Г. И. Линейные электрические цепи. М.: Энергия, 1978. 592 с. Ч. II и III. Атабеков Г. И., Купалян С. Д., Тимофеев А. Б., Хухриков С. С. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. М.: Энергия, 1979. 432 с.

Дополнительная литература

4.7. **Атабеков Г. И.** Основы теории цепей. М.: Энергия, 1969. 424 с.

4.8. **Сигорский В. П., Петренко А. И.** Алгоритмы анализа электронных схем. М: Советское радио, 1976. 608 с.

4.9. **Белецкий А. Ф.** Основы теории линейных электрических цепей. М.: Связь, 1967. 608 с.

4.10. **Бессонов Л. А.** Линейные электрические цепи. М.: Высшая школа, 1983, 320 с.

4.11. **Расчет** электрических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ/М. Г. Александрова, А. Н. Белянин, В. Брюкнер и др./Под ред. Л. В. Данилова, Е. С. Филиппова. М.: Радио и связь, 1983. 344 с.

4.12. **Дезоер Ч., Ку Э.** Основы теории цепей. М.: Связь, 1976. 288 с.

4.13. **Чуа Л. О., Пен-Мин-Лин.** Машинный анализ электронных схем. М.: Энергия, 1980. 640 с.

4.14. **Матханов П. Н.** Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. М.: Высшая школа, 1981. 333 с.

4.15. **Максимович Н. Г.** Методы топологического анализа электрических цепей. Львов: Изд. Львовского ун-та, 1970. 258 с.

4.16. **Касаткин А. С., Немцов М. В.** Электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1983. 440 с.

4.17. **Теория** линейных электрических цепей/Б. П. Афанасьев, О. Е. Гольдин, И. Г. Кляцкин, Г. Я. Пинес. М.: Высшая школа, 1973. 592 с.

4.18. **Толстов Ю. Г.** Теория линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1978. 279 с.

4.19. **Карни Ш.** Теория цепей. Анализ и синтез. М.: Связь, 1973. 368 с.

4.20. **Сешу С., Рид М. Б.** Линейные графы и электрические цепи. М.: Высшая школа, 1971. 448 с.

4.21. **Харари Ф.** Теория графов. М.: Мир, 1973. 300 с.

4.22. **Оре О.** Теория графов. М.: Наука, 1968. 352 с.

4.23. **Зелингер Дж.** Основы матричного анализа и синтеза. М.: Советское радио, 1970. 240 с.

4.24. **Абрахамс Дж. и Каверли Дж.** Анализ электрических цепей методом графов. М.: Мир, 1967. 175 с.

4.25. **Пенфилд П., Спенс Р., Дюинкер С.** Энергетическая теория электрических цепей. М.: Энергия, 1974. 152 с.

4.26. **Техника** высоких напряжений/Под ред. Д. В. Разевига. М.: Энергия, 1976. 488 с.

4.27. **Федосеев А. М.** Релейная защита. М.: Энергия, 1976. 560 с.

4.28. **Зиновьев А. Л.** Введение в теорию сигналов и цепей. М.: Высшая школа, 1975. 261 с.

4.29. **Харкевич А. А.** Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962. 236 с.

4.30. **Баскаков С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1983. 536 с.

4.31. **Оппенгейм А. В., Шафер Р. В.** Цифровая обработка сигналов/Пер. с англ. под ред. С. Я. Шаца. М.: Связь, 1979. 416 с.

4.32. **Круг К. А.** Переходные процессы в линейных электрических цепях. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1948. 344 с.

4.33. **Базуткин В. В., Дмоховская Л. Ф.** Расчеты переходных процессов и перенапряжений. М.: Энергоатомиздат, 1983. 328 с.

4.34. **Диткин В. А. и Прудников А. П.** Операционное исчисление. М.: Высшая школа, 1975. 408 с.

4.35. **Дёч Г.** Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и z-преобразования. М.: Наука, 1971. 288 с.

4.36. **Левинштейн М. Л.** Операционное исчисление в задачах электротехники. Л.: Энергия, 1972. 358 с.

4.37. **Теумин И. И.** Справочник по переходным электрическим процессам. М.: Связьиздат, 1951. 411 с.

4.38. **Заде Л., Дезоер Ч.** Теория линейных систем. Метод пространства состояний. М.: Наука, 1970. 704 с.

4.39. **Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э.** Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 915 с.

4.40. **Бабаков И. М.** Теория колебаний. М.: Наука, 1968. 559 с.

4.41. **Гантмахер Ф. Р.** Теория матриц. М.: Наука, 1967. 575 с.

4.42. **Зелях Э. В.** Основы общей теории линейных электрических схем. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 336 с.

4.43. **Матханов П. Н.** Основы синтеза линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1976. 208 с.

4.44. **Гиллемин Э. А.** Синтез пассивных цепей. М.: Связь, 1970. 720 с.

4.45. **Босый Н. Д.** Электрические фильтры. Киев: Гостехиздат УССР, 1959. 616 с.

4.46. **Современная** теория фильтров и их проектирование/Под ред. Г. Темеша и С. Митра. М.: Мир, 1977. 560 с.

4.47. **Лэм Г.** Аналоговые и цифровые фильтры. М.: Мир, 1982. 592 с.

4.48. **Ульянов С. А.** Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970. 519 с.

4.49. **Караев Р. И.** Переходные процессы в линиях большой протяженности. М.: Энергия, 1978. 192 с.

4.50. **Бессонов Л. А.** Нелинейные электрические цепи. М.: Высшая школа, 1977. 343 с.

4.51. **Данилов Л. В.** Электрические цепи с нелинейными R-элементами. М.: Связь, 1974. 136 с.

4.52. **Колосов С. П., Сидоров Ю. А.** Нелинейные двухполюсники и четырехполюсники. М.: Высшая школа. 1981. 224 с.

4.53. **Кушнир В. Ф. и Ферсман Б. А.** Теория нелинейных электрических цепей. М.: Связь, 1974. 383 с.

4.54. **Матханов П. Н.** Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи. М.: Высшая школа, 1977. 272 с.

4.55. **Мэзон С., Циммерман Г.** Электронные цепи, сигналы и системы. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 619 с.

4.56. **Филиппов Е.** Нелинейная электротехника. М.: Энергия, 1976. 496 с.

4.57. **Буль Б. К.** Основы теории и расчета магнитных цепей. М.—Л.: Энергия, 1964. 464 с.

4.58. **Основы** теории электрических аппаратов/Под ред. Г. В. Буткевича. М.: Высшая школа, 1970. 600 с.

4.59. **Коген-Далин В. В., Комаров Е. В.** Расчет и испытание систем с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1977. 248 с.

4.60. **Максвелл Дж. К.** Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехиздат, 1954. 688 с.

4.61. **Тамм И. Е.** Основы теории электричества. М.: Наука, 1976. 616 с.

4.62. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике [Вып. 5]. Электричество и магнетизм. М.: Мир, 1977. 300 с.

4.63. **Иоссель Ю. Я.** Расчет потенциальных полей в энергетике (справочная книга). Л.: Энергия, 1978. 350 с.

4.64. **Семенов Н. А.** Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973. 480 с.

4.65. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. [Вып. 6]. Электродинамика. М.: Мир, 1977. 347 с. [Вып. 3]. Излучение. Волны. Кванты. М.: Мир, 1967. 238 с.

4.66. **Тозони О. В.** Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия. 1975. 296 с.

4.67. **Брынский Е. А., Данилевич Я. Б., Яковлев В. И.** Электромагнитные поля в электрических машинах. Л.: Энергия, 1979. 176 с.

4.68. **Гоноровский И. С.** Проектирование *LCR* радиопередатчиков. М.: Связьиздат, 1934. 292 с.

4.69. **Каландаров П. Л., Цейтлин Л. А.** Расчет индуктивностей. Справочная книга. Л.: Энергия, 1970. 415 с.

4.70. **Иоссель Ю. Я., Качанов Э. С., Струнский М. Г.** Расчет электрической емкости. Л.: Энергия, 1981. 288 с.

Раздел 5

ПЛАНИРОВАНИЕ, ОРГАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКРОТЕХНИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

СОДЕРЖАНИЕ

5.1. Общие сведения 151
5.2. Синтез экспериментального комплекса . 152
Основные задачи синтеза (152). Выбор структуры экспериментального комплекса (153). Оптимизация экспериментального комплекса (157).
5.3. Преобразование сигналов в измерительном тракте 157
Преобразование наблюдаемой величины в измеряемую (157). Усреднение воздействия (158). Частотная селекция (159). Перенос или трансформация спектра (159). Дискретизация значений наблюдаемой переменной (160).
5.4. Синтез алгоритма эксперимента . . . 160
Взаимодействие объекта и аппаратуры (160). Выделение сигнала из помех (161). Планирование эксперимента (162).
5.5. Измерение параметров электрических процессов 163
5.6. Особенности параметризации электрических цепей (задачи параметризации) . 165
5.7. Автоматизация электротехнического эксперимента 166
Структура автоматизированного экспериментального комплекса (166). Управляющие и вычислительные функции ЭВМ в АЭК (166). Архитектура АЭК (167). Системы ввода-вывода ЭВМ (170). Система связей в АЭК (171). Программное обеспечение АЭК (173).
Список литературы 174

5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Экспериментальные методы широко применяются в научных электротехнических исследованиях, при разработке и испытаниях образцов новой техники. При этом решаются задачи:

поиск новых электрофизических явлений, проявляющихся в отклонении поведения объекта исследования от прогноза, составленного на основе имеющихся представлений;

проверка вновь выдвигаемых научных гипотез путем создания и наблюдения ситуаций, в которых проверяемая гипотеза (и только она) может объяснить поведение объекта;

проверка правильности модели объекта, использованной при проектировании, и степени соответствия образца заданным требованиям;

количественная оценка влияния факторов, воздействие которых на объект исследования теоретически определено, но при проектировании или поверочном расчете по каким-либо причинам не может быть учтено в должной степени;

определение зависимостей между параметрами объектов, процесс функционирования которых частично (иногда в значительной степени) неизвестен исследователю (работа с «черным ящиком»);

проверка адекватности и определение диапазона применимости функциональной модели объекта, построенной по его внешним характеристикам.

Развитие науки и техники, с одной стороны, приводит к постоянному усложнению структуры объектов эксперимента и выполняемых ими функций, а с другой стороны, дает экспериментатору мощные средства получения и обработки информации, позволяющие глубже проникнуть в существо изучаемых объектов и процессов. В результате резко усложняются экспериментальные комплексы, увеличиваются потоки первичной информации, расширяются связи объекта с внешней средой, в том числе не поддающиеся управлению, а иногда и контролю, возрастает необходимость учета влияния воздействий на объект внешней среды (в том числе и самого экспериментального комплекса), растут требования к динамическому диапазону, точности и быстродействию средств измерения.

Резкое усложнение информационного процесса, связанного с экспериментом, привело к необходимости его автоматизации с применением ЭВМ. Последняя не только повышает эффективность эксперимента, но, главное, может качественно изменить характер экспериментального исследования и значительно расширить его возможности.

Усложнение взаимосвязей и расширение возможностей эксперимента предопределяют системный подход к синтезу экспериментального комплекса и алгоритма эксперимента, выбору системы параметров, определяющих характер процессов в исследуемом объекте.

Технический эксперимент по сравнению с сугубо научными исследованиями обладает рядом специфических особенностей. Принципиально является недопустимым неограниченное упрощение объекта исследования, очистка его от мешающих в данном конкретном эксперименте деталей и особенностей. В большинстве случаев невозможной оказывается даже сколько-нибудь существенная декомпозиция объекта. В силу экономических и технологических факторов, заданных сроков разработки объем эксперимента ограничен как по числу образцов, так и по количеству управляемых и контролируемых переменных. Обычно существенно ограничен допустимый диапазон внешних воздействий, зачастую должно быть исключено не только разрушение объекта исследований, но даже кратковременное нарушение его работоспособности.

Все вышесказанное относится к экспериментам в любой отрасли техники. В настоящем разделе рассматривается как общая неспецифичная идеология подготовки и проведения эксперимента, в том числе электротехнического, так и особенности реализации общих принципов экспериментальных исследований с учетом особенностей электрофизических процессов, характерных черт испытуемых объектов и существенного экспериментального оборудования. При этом основное внимание уделено формированию потока экспериментальной информации и его обработке на уровне электрофизических свойств объекта. Вопросы собственно измерений затрагиваются только по необходимости, более полный материал по электроизмерительной аппаратуре и метрологии может быть найден в литературе. Также не рассматриваются

функциональные особенности системы, устройства, в рамках которого проводится исследование электрофизических процессов. Интерпретация электрических величин по отношению к функциям и структуре отдельных электротехнических систем, машин, устройств и элементов имеется в соответствующих разделах настоящего справочника.

5.2. СИНТЕЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Основные задачи синтеза

Экспериментальный комплекс — это организационно-техническая система, предназначенная для получения, обработки и отображения информации — результатов экспериментального исследования объекта.

Состав экспериментального комплекса (ЭК) и исходные данные для его построения:

1. Объект исследования вместе с частью его естественной среды, т. е. со всеми необходимыми для поддержания его существования функционирования системами.

2. Источники стабилизирующих и стимулирующих воздействий, позволяющие создавать режимы объекта, предусмотренные проверяемой гипотезой.

3. Приемники информации, в том числе измерительные преобразователи, измерительные приборы, обеспечивающие сравнение с мерой, средства обработки результатов измерений.

4. Система управления, координирующая по функциям и синхронизирующая во времени режимы объекта, источников стимулирующих воздействий и приемников информации.

5. Программа эксперимента, представляющая, по существу, «перевод» проверяемой гипотезы в термины, определяющие режимы составляющих ЭК и представляющие весь эксперимент как последовательность отдельных этапов (элементарных экспериментов).

6. Экспериментатор как интеллектуальная личность или группа личностей, оценивающая и корректирующая ход эксперимента.

Обязательное наличие экспериментатора является принципиальным моментом, отличающим ЭК от различных измерительных систем. Причина различия — в качественной непредсказуемости результата эксперимента в отличие от измерительной процедуры, где неопределенность ограничивается количественным значением измеряемого параметра, но качественная определенность процесса измерения предполагается априорно заданной. Следствием этого с точки зрения системного анализа ЭК, является появление дополнительного, по сравнению с измерительной системой, контура обратной связи, замыкающегося через экспериментатора и не поддающегося предварительному формальному описанию.

На практике обычно экспериментатор, кроме анализа результатов, выполняет значительную часть функций других компонентов ЭК, поддерживая существование режима объекта, обеспечивая выдачу части стимулирующих воздействий, обрабатывая результаты измерений, управляя ЭК и в реальном масштабе времени генерируя детальную программу эксперимента.

Исходными данными для построения экспериментального комплекса являются:

1. Описание объекта, его модель, включающая в себя теоретическое представление о процессах, происходящих в объекте, технические характеристики, количественно уточняющие теоретическое описание или дополняющие его неучтенными деталями, сведения о доступности объекта для эксперимента в части количества образцов, располагаемого времени и диапазона допустимых воздействий.

2. Проверяемая гипотеза, сформулированная в связи и в соответствии с описанием объекта. Гипотеза может быть тривиальной, например сводиться к утверждению о существовании параметра, находящегося в заданном поле допуска, или может предсказывать сложные качественные особенности поведения объекта. Все предусмотренные гипотезой воздействия и реакции должны исходить из описания объекта.

3. Ограничения на средства эксперимента в части источников воздействий на объект, измерительных преобразователей и аппаратуры, средств передачи, обработки, хранения и отображения получаемой информации.

Перечисленная информация поступает из различных, не связанных источников и обычно в момент постановки задачи оказывается несовместимой и по существу не позволяющей провести требуемый эксперимент. Исключения составляют задачи, сводящиеся к повторению (с незначительными вариациями) ранее проведенного эксперимента, когда синтез ЭК по существу уже проведен.

Первой задачей синтеза ЭК является согласование исходных данных, затем следует построение ЭК и проведение эксперимента.

При согласовании исходных данных ЭК должны быть обеспечены:

1. Соответствие исходных посылок проверяемой гипотезы и описания объекта в части управляемости и измеряемости требуемых переменных, допустимости требуемых режимов и их реализуемость при имеющихся ресурсах, отсутствие в объекте эффектов, имитирующих ожидаемые результаты независимо от справедливости гипотезы.

2. Соответствие проверяемой гипотезы ограничениям на средства эксперимента. Несоответствия могут возникать в связи с невозможностью задать стимулирующие воздействия требуемого вида или невозможностью преобразовать наблюдаемую величину в форму, пригодную для последующей обработки информации с необходимой точностью, разрешающей способностью или быстродействием.

3. Соответствие описания объекта исследования и ограничений на средства эксперимента в части возможности функционального и физического сопряжения выходов источников стимулирующего воздействия и измерительных устройств с соответствующими элементами объекта без искажения его режима.

Согласование исходных данных — типичный процесс поиска оптимума, целью которого является возможно полная проверка гипотезы при минимальных затратах выделенных ресурсов.

Алгоритм процесса согласования исходных данных ЭК (рис. 5.1) включает в себя:

модельное, мысленное построение структуры ЭК,

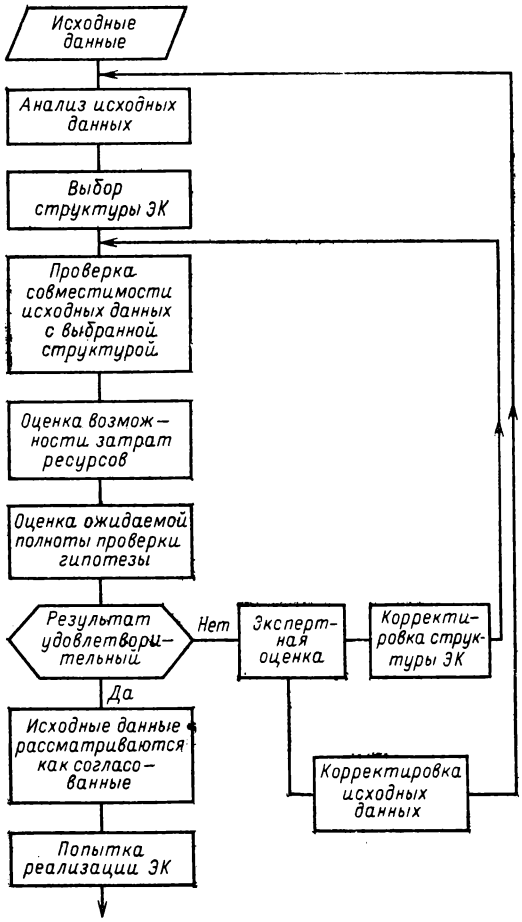


Рис. 5.1. Алгоритм процесса согласования исходных данных ЭК

оценку возможностей данной структуры в части достижения поставленной цели.

В случае приемлемых ожидаемых результатов следует переход к реализации ЭК, в случае неприемлемых ожидаемых расходов ресурсов или неполноты ожидаемой информации о справедливости проверяемой гипотезы — переход к анализу следующей возможной структуры. Если в пределах заданных исходных данных переход к следующей структуре невозможен, должно вноситься изменение в исходные данные. Такой алгоритм характерен для любой разработки какой-либо системы и в ходе НИОКР реализуется на этапе составления и согласования ТЗ (см. § 9.1). Формальное выполнение его обычно затрудняется отсутствием однозначных критериев на этапах формирования оценок, связанных с необходимостью привлечения неприемлемо большого количества несистематизированной информации. По мере приближения задачи разработки к задаче типового проектирования эта неопределенность уменьшается. Особенностью согласования исходных данных при построении ЭК является наличие принципиально неустранимой неопределенности — гипотезы, справедливость которой не доказана. В условиях неопределенности скорость и качество решения задачи в значительной степени зависят от опыта экспериментатора, однако могут быть сформулированы некоторые общие рекомендации.

Выбор структуры экспериментального комплекса

Простейшая структура соответствует наблюдательному эксперименту.

Наблюдательный эксперимент имеет место, когда источники стимулирующих воздействий как самостоятельный компонент ЭК не существуют. Предполагается, что множество состояний объекта и среды его функционирования содержит режимы, рассматриваемые как исходные для проверяемой гипотезы, и эти режимы реализуются с достаточно высокой вероятностью. Средства измерения и обработки информации должны обеспечить опознавание таких режимов, накопление информации о них, обработку этой информации и представление ее оператору в виде, предусмотренном программой эксперимента (рис. 5.2).

Для проверки совместимости исходных данных с такой структурой ЭК следует рассмотреть:

1. Возможность возникновения при нормальном функционировании объекта необходимых для проверки гипотезы режимов или последовательностей режимов.

2. Оценку необходимого времени наблюдения, объема подлежащей обработки информации и требований к быстродействию средств измерения и обработки информации.

3. Допустимость искажений режимов при подключении измерительной аппаратуры к требуемым точкам объекта и сопрягаемым с ним внешних устройств с точки зрения состояния объекта и реализуемости исходных данных проверяемой гипотезы.

При рассмотрении первого и третьего вопросов следует учитывать, что любая практически значимая гипотеза, строго говоря, может быть подтверждена только на бесконечном материале, поэтому факт неполного охвата в на-

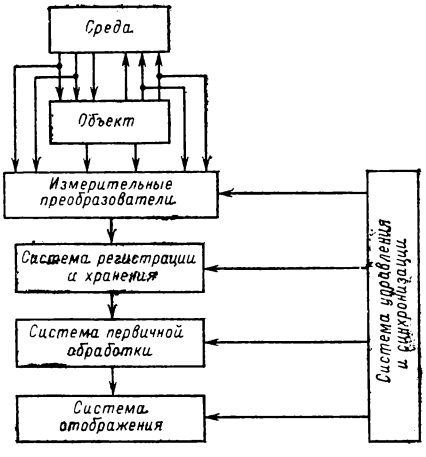


Рис. 5.2. Структура ЭК для наблюдательного эксперимента

блюдательном эксперименте области действия проверяемой гипотезы сам по себе не является основанием для отбраковки рассматриваемой структуры ЭК.

Для проверки совместимости описания объекта и гипотезы в рамках данной структуры ЭК необходимо на основе априорной информации оценить значимость режимов для достаточно полного подтверждения гипотезы, возможную достоверность (точность) результатов отдельных измерений, сопоставимость результатов элементарных экспериментов в смежных режимах. При наличии таких сведений могут быть поставлены задачи вычисления апостериорной вероятности справедливости проверяемой гипотезы по результатам любого опробованного сочетания режимов и определения сочетаний режимов, опробование которых может подтвердить данную гипотезу с требуемой достоверностью [5.1, 5.2].

Вероятностные расчеты не требуются в очевидных случаях, когда реальные режимы объекта существенно перекрывают диапазон действия проверяемой гипотезы или, наоборот, в диапазон реальных режимов не попадают ситуации, проверка которых однозначно необходима для подтверждения гипотезы.

Оценку потребного времени эксперимента и аппаратурных затрат необходимо проводить с привлечением предполагаемой программы эксперимента. Здесь могут рассматриваться следующие основные варианты:

1. Непрерывное измерение и запоминание значений всех переменных, которые необходимо учитывать в данном эксперименте с последующим выделением интервалов, соответствующих режимам, подлежащим опробованию, и обработкой данных, относящихся к этим интервалам.

В этом случае весь тракт измерения и запоминания должен обладать достаточным быстродействием и максимальным динамическим диапазоном, требуется максимальный объем памяти. Необходимый интервал наблюдения, содержащий требуемый набор заданных режимов, в зависимости от закона следования режимов объекта можно определить точно или с заданной достоверностью. Средства обработки информации выбираются независимо от физических параметров объекта и измерительной аппаратуры. Требования к быстродействию средств обработки определяются допустимой задержкой результата эксперимента относительно интервала наблюдения. Накапливаемая в памяти информация в значительной степени избыточна, но это может оказаться полезным, если по результатам анализа потребуется изменить программу обработки данных.

2. В случае, если описание объекта позволяет по каким-либо переменным с достаточным упреждением опознавать появление режима, подлежащего проверке, требования к средствам измерения и записи могут быть снижены:

введена предварительная настройка измерительных приборов на параметры конкретного режима, что облегчает требования к их динамическому диапазону;

устраняется избыточность запоминаемой информации, т. е. уменьшается требуемый объем памяти;

параметры режима или их часть могут вообще не измеряться, достаточно фиксировать лишь индекс режима, что упрощает средства измерения и дополнительно уменьшает используемый объем памяти.

Из функций средств обработки информации исключается простая, но громоздкая функция просмотра накопленного материала и выделения заданных режимов.

Для упреждающего опознания режима может потребоваться быстродействующий анализатор, если только признак режима не формируется в объекте с достаточным опережением, система управления средствами измерения должна достаточно быстро выдать команды на установление оптимальных для данного режима средств измерения приборов, а средства измерения должны успеть принять и выполнить эти команды.

В случае, если описание объекта позволяет обосновать воспроизводимость режимов при реальном функционировании объекта, т. е. можно утверждать об отсутствии (с требуемой точностью) необратимых изменений в объекте, появляется возможность организовать выборку режимов, подлежащих опробованию, из естественной последовательности режимов объекта не в порядке их следования. Можно относительно медленно настроить все средства измерения и регистрации на определенный индекс режима, соответствующий относительно узкому диапазону возможных значений наблюдаемых величин, и затем ожидать появления именно этого режима.

В этом случае требование работы в реальном масштабе времени предъявляется только к анализатору режима и устройству выборки и кратковременного хранения информации. Поскольку часть режимов, подлежащих опробованию, может не фиксироваться, резко увеличивается время накопления информации.

Простейшим примером такого построения измерительной системы является применение стробоскопического осциллографа, при этом на одной реализации импульсного процесса (причем не на каждой) фиксируется одна из нескольких сот ординат, что приводит к увеличению в 10^3—10^9 раз времени накопления информации по сравнению с прямой записью.

Существенным недостатком чисто наблюдательной структуры ЭК, затрудняющим согласование исходных требований, зачастую оказываются резко завышенные требования к точности и разрешающей способности измерительной аппаратуры и детальности описания объекта.

Во многих случаях подлежащий исследованию процесс протекает на фоне многочисленных, иногда значительно более мощных процессов объекта. При этом связи между переменными в объекте могут быть весьма сложны. В результате даже относительно простое утверждение гипотезы может для переменных объекта превратиться в сложное интегродифференциальное уравнение, исходные данные для решения которого получаются в процессе измерений при значительных помехах, а коэффициенты известны из модели объекта весьма приближенно. Как следствие чисто наблюдательная структура ЭК может быть применена лишь для исследования относительно мощных процессов, имеющих какие-либо явные отличительные признаки во временных, амплитудных или частотных характеристиках, позволяющих достаточно про-

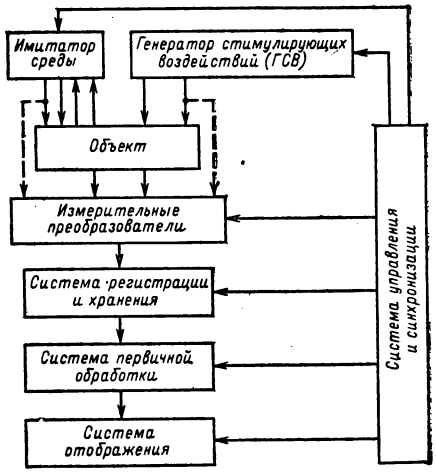


Рис. 5.3. Структура ЭК для автономного эксперимента

сто обеспечить выделение сигналов на уровне помех измерительных преобразователей.

Исследование объекта в автономном режиме. В этом случае объект полностью изолируется от реальной системы и все стимулирующие воздействия создаются специальной системой экспериментального комплекса (рис. 5.3). Такое построение ЭК приводит к изъятию объекта из эксплуатации и к необходимости создания достаточно сложного устройства, имитирующего с требуемой степенью полноты реальную систему, с которой должен взаимодействовать объект, что всегда ведет к большим или меньшим затратам.

Основанием для такого варианта могут быть:

отсутствие реальной системы на момент исследования объекта;

необходимость проведения эксперимента до установки объекта в систему в связи с невозможностью предсказать отдельные детали их взаимодействия;

недоступность объекта для исследования после установки его в реальную систему;

невозможность создать требуемые режимы объекта в системе из-за неуправляемости или ограниченной управляемости отдельных параметров системы;

невозможность создать требуемые режимы объекта в системе из-за резкого отклонения системы в целом от оптимального режима, приводящего к значительным экономическим потерям;

недопустимость создания требуемых режимов объекта в системе из-за возможных опасных последствий;

невозможность в составе системы реализовать достаточно малый уровень шумов, наводок и помех, что не позволяет получить требуемую точность результатов измерений.

При автономном режиме появляется возможность резко сократить время эксперимента, уменьшить трудовые и материальные затраты на построение и обслуживание измерительного комплекса и систем обработки результатов измерений.

Следует учитывать, что дополнительные расходы на создание источников стимулирующих воздействий могут быть резко снижены, если ЭК строится на основе испытательных установок, предназначенных для производственных испытаний объектов исследования.

Программа эксперимента и структура ЭК строятся в следующих вариантах:

1. Полная имитация реального режима. В этом случае достигается управляемость всех переменных, стабилизация режимов, т. е. уменьшаются случайные погрешности, связанные с неопределенностью режима объекта, обеспечивается наиболее рациональная последовательность режимов, позволяющая с минимальными затратами времени опробовать наиболее информативные режимы.

2. Осуществление режима, близкого к реальному, в расширенных диапазонах переменных. В этом случае дополнительно к первому варианту реализуются режимы, обеспечивающие наибольшие значения измеряемых откликов на стимулирующие воздействия, однако вывод объекта за пределы нормальных рабочих диапазонов переменных может привести к ошибочным выводам, если не учитывать возможных качественных изменений внутриобъектовых связей при увеличении стимулирующих воздействий.

3. Создание искусственного режима, подобного реальному в части взаимодействия элементов объекта исследования, но имеющего качественные отличительные черты по объекту в целом. Например, периодизация режима, создание стимулирующих сигналов специальной формы или специфичного спектрального состава. В этом случае достигается соотношение структур помех и полезных сигналов на входе измерительной аппаратуры, облегчающее их разделение.

Декомпозиция объекта. В данном случае либо объект физически расчленяется на отдельные части, либо отдельные части объекта исследуются порознь в составе объекта, при этом

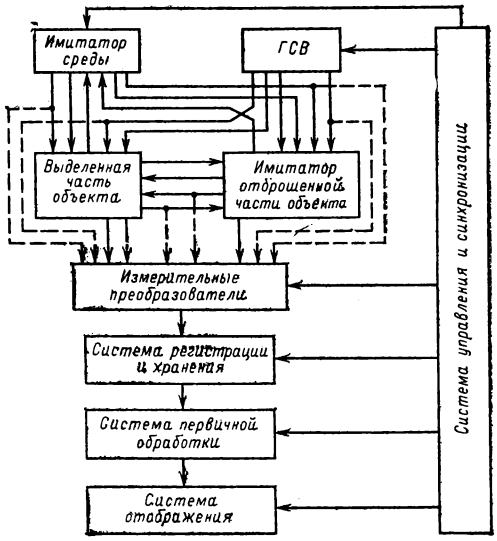


Рис. 5.4. Структура ЭК при декомпозиции объекта

режим объекта в целом существенно отличается от реального (рис. 5.4).

Внешне построение ЭК в этом случае мало отличается от рассмотренных выше, однако суть эксперимента резко усложняется. Декомпозиция объекта не изменяет исходной ситуации, а именно того, что проверяемая гипотеза была сформулирована по отношению к объекту в целом. Поэтому если ранее задачей эксперимента являлось подтверждение гипотезы, то после декомпозиции объекта добавилась задача подтверждения допустимости декомпозиции. В подавляющем большинстве случаев результаты, полученные на выделенной части объекта, не могут быть без ограничений применены к целостному объекту.

Комбинированные структуры. В большинстве случаев структуры, перечисленные выше, реализуются в некотором сочетании. Типичным путем формирования структуры ЭК является неполная изоляция объекта исследования от его естественной среды, наиболее характерными вариантами при этом являются:

1. Наложение стимулирующего воздействия на рабочий режим. При этом почти полностью сохраняются связи объекта с системой, его режим, объект нормально может выполнять свои функции. Для проведения эксперимента создаются или выбираются источники стимулирующих воздействий, приемники информации и средства обработки, система управления, обеспечивающие аддитивное или мультипликативное введение стимулирующих воздействий в существующие связи и отбор информации без нарушения связей объекта с системой (рис. 5.5). Такой вариант может быть очень экономичным с точки зрения обеспечения режимов функционирования объекта и сохранения его в эксплуатации, но имеет и отрицательные стороны:

в законченной конструкции ЭК введение стимулирующих воздействий и вывод сигналов могут быть затруднены;

на диапазон и характер стимулирующих воздействий обычно накладываются жесткие ограничения во избежание резкого ухудшения эксплуатационных показателей системы;

обратные связи в системе могут реагировать на введение стимулирующих воздействий, т. е. отклик может определяться не только и даже не столько самим объектом, но совокупно объектом и внешней для него системой;

могут возникать трудности при разделении отклика объекта на составляющие, соответствующие нормальному его режиму, и составляющие, вызванные стимулирующими воздействиями.

2. Неполная изоляция объекта от системы. При этом, как правило, сохраняются основные связи, обеспечивающие фунционирование объекта, требующие наибольших затрат энергии и трудоемкие в моделировании. Под управление собственных средств экспериментального комплекса передается часть внешних связей объекта, достаточная для задания режимов в требуемых диапазонах (рис. 5.6). Такой вариант также позволяет экономить значительные средства и время за счет использования имеющихся эксплуатационных или испытательных систем поддержания рабочего состояния объекта, но ограничивает диапазон режимов в эксперименте, их последовательность и зачастую препятствует исключению или уменьшению влияния многих источников помех и шумов.

3. Неполная декомпозиция объекта. При этом в объект вносятся изменения, не влияющие или мало влияющие на достоверность эксперимента, но допускающие расширение или изменение диапазона возможных стимулирующих воздействий. Такое вмешательство в объект может быть направлено на отключение отдельных стабилизирующих цепей, устройств защиты, исключение контрольных операций, препятствующих выходу объекта в отдельные режимы, не предусмотренные нормальным эксплуатационным процессом (рис. 5.7).

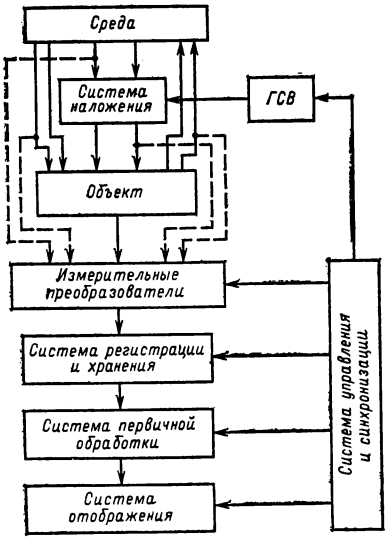


Рис. 5.5. Структура ЭК при наложении стимулирующих воздействий

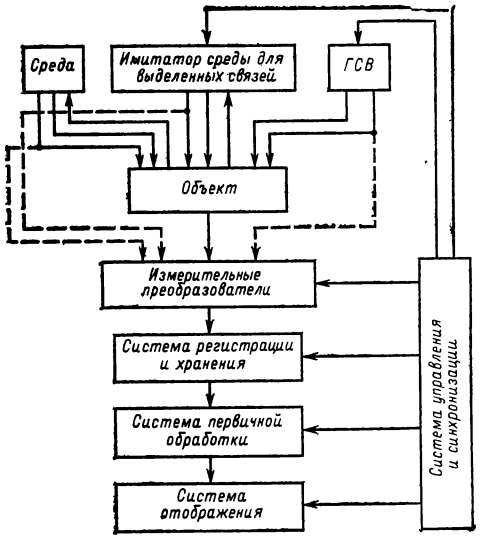


Рис. 5.6. Структура ЭК при неполной изоляции объекта

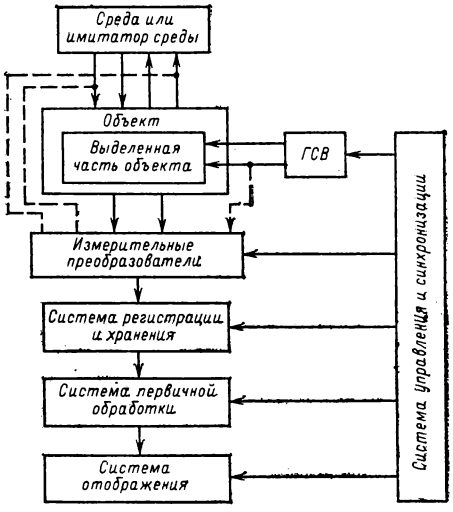


Рис. 5.7. Структура ЭК при неполной декомпозиции объекта

Оптимизация экспериментального комплекса

Целью оптимизации ЭК является обеспечение наибольшей достоверности вывода о проверяемой гипотезе при наименьших затратах на проведение эксперимента. Такой формулировкой в силу ее абстрактности невозможно ограничиться в конкретном случае, но она обязательно должна постоянно учитываться при синтезе ЭК. Конкретизация целевой функции в экспериментальном исследовании принципиально затруднена, поскольку, во-первых, при исследовании неизвестных явлений заведомо отсутствуют объективные оценки стоимости получаемой информации, во-вторых, весьма сложно оценить затраты на создание оригинальных узлов ЭК и особенно затраты времени и выигрыш, достигаемый при сокращении времени проверки гипотезы.

Следует отметить, что выяснение всех вышеуказанных вопросов может до неприемлемого уровня увеличить затраты на собственно формирование целевой функции (особенно затраты времени).

Несмотря на эти объективные трудности, формирование целевой функции при оптимизации ЭК должно обязательно проводиться во избежание грубых ошибок, которые в современном техническом эксперименте могут привести к невосполнимым потерям.

Наиболее приемлем метод экспертных оценок, причем должны учитываться:

достоверность проверки справедливости проверяемой гипотезы, достаточная для внедрения выводов проверяемой гипотезы в практику;

ограничения достижимого уровня достоверности проверки в связи с ограниченностью исходных данных;

возможный выигрыш от внедрения выводов проверяемой гипотезы в практику, в том числе появление новых технических возможностей, качественно отличающихся от ранее имевшихся;

затраты на изготовление или отвлечение из эксплуатационного процесса объекта исследования и связанных с ним систем;

затраты на создание экспериментального комплекса, в том числе на разработку и изготовление оригинальных узлов;

затраты на проверку и калибровку ЭК;

затраты на непосредственное проведение эксперимента с учетом времени, потребного для обработки и оценки результатов;

возможное расширение фронта научных и инженерных работ или закрытие неперспективных направлений в результате проведения эксперимента;

зависимость оценки двух последних факторов от времени, затрачиваемого на проверку гипотезы;

возможные вторичные эффекты, связанные с применением создаваемого ЭК для родственных задач независимо от результатов проверки конкретной гипотезы;

возможность использования отдельных частных решений, достигаемых в процессе создания данного ЭК;

возможные затраты на внедрение полученных результатов с учетом неизбежной необходимости многократного повторения и вариаций эксперимента для получения результатов, охватывающих режимы, несущественные для подтверждения гипотезы, но обязательные для получения количественных данных для инженерного применения выявленных эффектов;

наличие конкурирующих направлений исследования, решающих аналогичные технические задачи непосредственно или допускающих использование их результатов для косвенной проверки рассматриваемой гипотезы возможно с некоторыми дополнительными затратами;

ограниченность априорной информации, принципиально исключающая однозначное определение достигаемого эффекта даже при положительном результате эксперимента.

5.3. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ТРАКТЕ

Преобразование наблюдаемой величины в измеряемую

Существующее множество разновидностей измерительных преобразователей, применяемых в технике [5.8, 5.9], многие эффекты, известные и используемые в экспериментальной физике, позволяют утверждать, что обеспечение эксперимента преобразователями сигнала не вносит принципиальных ограничений и затруднения определяются недостатком информации или установленными пределами затрат на эксперимент. Однако на практике выбор преобразователей сигналов в измерительном тракте зачастую является одной из центральных проблем при построении ЭК, удачное решение которой в значительной степени определяет дальнейшую подготовку и ход эксперимента.

Объективной причиной, придающей такое значение выбору преобразователей сигналов, является несоответствие имеющегося описания объекта исследования номинальным возможностям средств измерения и ограниченное соответствие номинальных свойств средств измерения их реальным свойствам. Существующие методы анализа, описания и моделирования

реальных объектов основаны на декомпозиции процесса, расчленении его на отдельные составляющие, описываемые порознь. Анализ эффектов, положенных в основу рабочего процесса измерительных преобразователей, также проводится для идеализированных условий, номинальное описание реальных преобразователей опирается на их параметры, получаемые в строго определенных испытательных и поверочных ситуациях.

В то же время в объекте исследования все процессы существуют как неразрывное целое. Во многих случаях отсутствуют сколько-нибудь объективные основания для выделения в реальном наблюдаемом физическом процессе различных составляющих (постоянных, переменных, периодических, гармонических, нормальных к поверхности и т. п.). Также любой измерительный преобразователь реагирует на процесс, усредненный в некоторых объемах и интервале времени, границы которых могут быть весьма неопределенны.

Только при проведении простейших по цели экспериментов (хотя по реализации они могут быть весьма громоздкими и сложными), направленных на уточнение описания хорошо изученных объектов, оказывается возможным при выборе преобразователей сигналов ограничиться анализом их метрологических характеристик на предмет обеспечения заданной точности. В большинстве случаев *экспериментатор должен на основе имеющейся априорной информации установить применимую для данного случая интерпретацию связи характеристик физического процесса, воздействующего на преобразователь, и некоторого параметра его выходной величины.* При этом должны учитываться особенности описания процесса преобразования в пространстве и во времени. В обоих случаях значительный эффект с точки зрения упрощения математической обработки и наглядности результатов может дать переход от реальных, существующих в пространстве и времени величин к их изображениям, например в виде частотных спектров. В указанном смысле анализ рабочего процесса измерительных преобразователей является задачей анализа фильтра [5.4, 5.5].

Различные методы фильтрации применяются в ЭК и на этапе обработки результатов измерения, причем там одной из задач фильтрации является компенсация фильтрующих свойств измерительных преобразователей. На этапе обработки результатов измерения применяются разнообразные математические методы, приводящие в сложных случаях к построению алгоритмов фильтрации, требующих большого объема вычислений и введения в ЭК мощных ЭВМ.

Для измерительных преобразователей характерными являются операции усреднения, выделения или подавления частотных составляющих, перенос или трансформация спектра, дискретизация. Применительно к этим операциям определяются номинальные характеристики преобразователей.

Усреднение воздействия

Усреднение во времени связано с инерционностью любого процесса и наложением откликов на разновременные воздействия. В простейшем приближении линейного описания в преобразователе выходная величина y связана с входной величиной x соотношением

$$y(t) = \int_{-\infty}^{t} x(\tau)\, g(t-\tau)\, dt.$$

Наблюдаемое значение $y(t)$ является суммой прошедших значений $x(\tau)$ с весовой функцией $g(t-\tau)$. В случае, если $g(t)$ приближается к виду $g(t)=1$ при $0<t<T$ и $g(t)=0$ при $t>T$, можно говорить об усреднении значения $x(t)$ на интервале длительностью T.

При постановке эксперимента встречаются следующие подходы к интерпретации такой связи.

1. Функция $g(t)$ формируется специально или нормируется с требуемой точностью и учитывается при обработке результатов.

2. Функция $g(t)$ специально не формируется и учитывается через параметр — время установления преобразователя $t_{уст}$. Оценка получаемого результата зависит от вида аппроксимации $g(t)$, уровня отсчета времени установления и характера изменения $x(\tau)$ за этот интервал времени. Так, если $g(t)$ приближается к экспоненте, время установления отсчитывается по уровню 0,9, а $x(\tau)$ мало меняется на интервале $t_{уст}$, $y(t)$ можно рассматривать как усредненное значение на интервале $0{,}4t_{уст}$.

3. Функция $g(t)$ вообще не учитывается. Такой подход весьма распространен. Он предельно упрощает дальнейшую обработку результатов, но требует применения датчиков с очень малым временем установления, значительно меньшим, чем время существенного изменения измеряемой величины. Для проведения эксперимента в отсутствие развитых средств обработки сигнала такой подход неизбежен, но при наличии развитой системы обработки результата эксперимента ужесточение требований к измерительным преобразователям нельзя считать оправданным и следует пользоваться вариантом 1.

Усреднение в пространстве связано с накоплением воздействия на заряженную частицу на отрезке пути. Это может быть отрезок траектории свободно движущейся частицы в электровакуумной системе (электронно-оптические системы, ускорители и т. п.) или участок проводящего контура с током (катушка магнитно-индукционного датчика, рабочий промежуток датчика Холла и т. п.). Результатом накопления является напряжение

$$u = \int_{L} E_l\, dl,$$

где L — путь интегрирования; E_l — тангенциальная составляющая напряженности.

В свою очередь, значение E_l может связываться с какой-либо измеряемой величиной (например, со скоростью изменения магнитного поля).

В большинстве случаев определить весовую функцию при значениях измеряемого параметра во всех точках рабочего пространства датчика весьма сложно. Кроме того, даже если весовая функция определена, для получе-

ния реального распределения измеряемой величины необходимо обобщить показания преобразователя при множестве положений в пространстве. Если в случае временно́го усреднения такое сканирование множества временны́х отсчетов происходит естественным путем за счет течения времени, то в пространстве требуется организовать перемещение датчика, причем за время, пока картина поля измеряемой величины не изменилась. В большинстве случаев от этого отказываются и рассматривают результат преобразования как среднее значение измеряемой величины в некотором объеме, определяемом размерами преобразователя.

Частотная селекция

Выделение частотных составляющих переменных, зависящих от времени, или, наоборот, их подавление можно рассматривать как случай, когда $g(t)$ приближается к виду $g(t)=e^{-at}\sin bt$, причем $a \ll b$. Частотная избирательность преобразователя может вытекать из его физической природы или же может вводиться специально. Применяя схемы со многими накопителями энергии, нелинейные элементы и элементы с управляемыми параметрами, можно формировать частотные характеристики со многими нулями и полюсами. С точки зрения построения ЭК представляют интерес следующие возможности:

избирательное пропускание сигнала, если его частотные составляющие, необходимые для проведения эксперимента, сосредоточены в диапазоне (или нескольких диапазонах), относительно свободном от действия помех;

избирательное подавление помех, если их частотные составляющие сосредоточены в диапазоне (или нескольких диапазонах), не перекрывающем необходимых для эксперимента частотных составляющих сигнала.

Формирование требований к частотной характеристике измерительного тракта и ее реализация не могут проводиться в отрыве от общего процесса синтеза ЭК.

Задание стимулирующих воздействий, в значительной степени определяющих спектральный состав откликов, построение систем управления и стабилизации режимов, спектральный состав помех, должно проводиться в связи с формированием частотной характеристики измерительного тракта, причем обычно предпочтительнее соответствующим образом сформировать воздействия на объект, нежели усложнять требования к частотной характеристике измерительного тракта.

Применяются в отдельности или в совокупности фильтрующие цепи следующих типов [5.4, 5.5]:

1) пропускающие фильтры (НЧ, ВЧ или полосовые), выделяющие значимую часть спектра сигнала;

2) перестраиваемые пропускающие фильтры, параметры которых меняются по сигналу управления при изменении режимов объекта в соответствии с прогнозируемым изменением спектра сигнала;

3) следящие пропускающие фильтры, непрерывно настраивающиеся на достаточно мощные частотные составляющие сигнала при условии, что в данном диапазоне мощность составляющих сигнала значительно превосходит мощность шумов и помех;

4) следящие пропускающие фильтры, непрерывно настраивающиеся на частоту опорного сигнала, поступающего от генераторов стимулирующих воздействий в предположении, что частотный спектр измеряемого сигнала достаточно полно определяется генератором стимулирующих воздействий;

5) заграждающие фильтры (НЧ, ВЧ или полосовые), уменьшающие коэффициент передачи тракта в диапазонах, где частотные составляющие сигнала имеют мощность, значительно меньшую мощности шумов и помех;

6) заграждающие фильтры, перестраиваемые по сигналу управления в соответствии с ожидаемым изменением диапазона действия помехи;

7) следящие заграждающие фильтры, непрерывно настраивающиеся на достаточно мощные частотные составляющие помехи;

8) следящие заграждающие фильтры, непрерывно настраивающиеся на частоту опорного сигнала, подаваемого от источника помехи в объекте исследования или в системе задания режима.

Наилучшие результаты могут быть получены при оптимальном сочетании всех перечисленных типов. При этом надо учитывать, что в большинстве случаев фильтры типов 4 и 8 обеспечивают наиболее полное выделение сигналов. В ряде случаев, когда задание опорных сигналов по каким-то техническим причинам затруднено, а спектральные составляющие сигнала и помехи достаточно обособлены, предпочтительнее оказывается применение типов 3 и 7. Поскольку следящие фильтрующие устройства строятся на элементах с управляемыми параметрами, их динамический диапазон зачастую существенно ограничен и между ними и датчиком желательно, а зачастую необходимо включать фильтры типов 1, 2 и 5, 6. Фильтры типов 1, 5 проще в реализации, но отсутствие перестройки может существенно ограничить возможности ЭК.

Выделение пространственных частотных составляющих требует одновременного измерения значений наблюдаемой величины в нескольких точках пространства. Последующая обработка сигналов должна проводиться с учетом конкретного размещения датчиков в пространстве.

Перенос или трансформация спектра

Перенос спектра, реализуемый при умножении переменной на гармонический опорный сигнал, или трансформация спектра повторяющегося процесса при умножении переменной на опорную последовательность импульсных сигналов (стробоскопическое преобразование) [5.6] является исключительно мощным средством, позволяющим упростить решение многих задач, а иногда получить единственное реализуемое решение. В то же время самостоятельного значения эта операция не имеет — смысл ее в согласовании частотных характеристик измерительного тракта и частотного спектра измеряемой величины. Перенос и

трансформация спектра являются основой построения следящих фильтрующих устройств и в этом применении должны рассматриваться при синтезе ЭК.

Дискретизация значений наблюдаемой переменной

Дискретизация значений результатов эксперимента на каком-то этапе обработки производится во всех случаях, по крайней мере при их окончательной регистрации и интерпретации. Введение дискретизации значений наблюдаемых переменных на ранних этапах обработки сигнала, особенно в измерительном тракте, само по себе не вносит принципиальных изменений в ход эксперимента. Поэтому применение дискретизации значений измеряемой величины, внедрение цифровых датчиков и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) должно находить обоснование за счет выигрыша на последующих этапах обработки данных. Основными последствиями перехода к цифровой форме представления результатов на выходе измерительного преобразователя при проведении соответствующих усовершенствований в других компонентах ЭК могут быть:

1) исключение появления и накопления дополнительных погрешностей при передаче, хранении и обработке сигнала. Следует отметить, что некоторая вероятность появления погрешностей всегда остается, причем могут возникать погрешности, несравнимо более грубые, чем при аналоговой обработке сигнала. Существенное снижение этой вероятности всегда достигается ценой уменьшения пропускной способности канала связи, информационной емкости накопителя, замедления вычислительной обработки за счет введения контрольных операций и увеличения разрядности операндов;

2) резкое расширение арсенала методов обработки результатов наблюдений в связи с возможностью использования мощных вычислительных систем. Большинство особенно эффективных алгоритмов обработки результатов наблюдений в настоящее время может быть реализовано только в цифровом вычислительном устройстве. Следует отметить, что при прочих равных условиях скорость обработки по сравнению с аналоговыми методами в конкретных простых преобразованиях всегда уменьшается, но с учетом возможности параллельной обработки проигрыш в скорости выполнения элементарных преобразований может быть компенсирован;

3) резкое упрощение адаптации ЭК к изменениям условий эксперимента, возможность использовать ЭК для широкого диапазона задач. В системах аналоговой обработки сигнала в связи с влиянием на погрешность результата многочисленных паразитных параметров элементов получить высокую точность и скорость обработки и в особенности реализовать сложные нелинейные операции удается только в сугубо специализированных вычислителях, не допускающих существенного изменения алгоритма работы без полного переконструирования.

Цифровые измерительные преобразователи характеризуются дискретностью отсчетов во времени и по уровню преобразуемой величины. Дискретизация во времени определяется двумя параметрами:

1) минимальным интервалом между отсчетами или минимальным разрешенным сдвигом фазы момента отсчета;

2) интервалом усреднения измеряемой величины.

Минимальный интервал между отсчетами характеризует возможность применения преобразователя для анализа быстропротекающих однократных процессов и полностью определяется быстродействием элементов преобразователя.

Минимальный разрешенный сдвиг фазы момента отсчета характеризует возможность применения преобразователя для анализа повторяющихся процессов. Сдвиг фазы при этом задается обычно внешним по отношению к преобразователю устройством. Минимальный разрешенный сдвиг фазы определяется нестабильностью момента отсчета преобразователя. Практически в режиме стробирования повторяющихся процессов дискретизация по времени уменьшается до уровня фазовых шумов системы синхронизации, т. е. дискретный преобразователь имеет в этом случае то же разрешение во времени, что и аналоговый.

Интервал усреднения измеряемой величины в явном виде задается для интегрирующих АЦП. Для других типов преобразователей интервал усреднения в явном виде обычно не задан. В большинстве случаев интервал усреднения определяется либо временем срабатывания нуль-органа АЦП, либо временем запоминания устройства выборки и хранения вводимого во входную цепь АЦП. Интервал усреднения может быть снижен до уровня минимального времени установления строб-преобразователей, т. е. до нескольких десятков пикосекунд.

Дискретизация по уровню преобразуемой величины при измерении постоянного напряжения однозначно ограничивает чувствительность преобразователя к малым изменениям измеряемой величины, что позволяет рассматривать значение кванта как одну из характеристик точности измерения.

Следует, однако, учитывать, что при измерении величин, имеющих шумовую составляющую, превышающую шаг квантования, с последующей статистической обработкой результатов влияние квантования на точность и разрешающую способность ЭК в целом исчезает, шум как бы размывает уровни квантования и с помощью АЦП можно обнаружить и точно измерять приращения сигнала, значительно меньшие шага квантования.

5.4. СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Взаимодействие объекта и аппаратуры

Синтез алгоритма эксперимента происходит в последовательных приближениях в процессе создания ЭК. При существенных изменениях задачи ЭК изменения происходят как в алгоритме эксперимента, так и в составе и конфигурации ЭК. Однако в небольших пределах алгоритм должен иметь возможность адаптироваться к изменениям задачи без пере-

стройки ЭК. В ходе эксперимента должны быть проведены:

реализация всех необходимых режимов объекта исследования, причем для повышения достоверности результатов может потребоваться многократное повторение всех или части режимов или, если полное повторение невозможно, многократная реализация близких режимов, которые с точки зрения проверяемой гипотезы идентичны в пределах допуска;

фиксация, измерение и обработка значений наблюдаемых величин, причем часть результатов обработки может быть необходима для определения дальнейшего хода эксперимента, т. е. эта часть обработки данных должна выполняться с максимальной скоростью и, если необходимо, отдельно от остальных операций обработки данных;

выдача команд на продолжение эксперимента в зависимости от результата, полученного на предыдущих этапах, причем часть команд может формироваться с привлечением оператора;

оформление результатов по заданной форме, которая может корректироваться в ходе эксперимента.

Информация от объекта поступает в средства обработки результатов наблюдений, обрабатывается и либо регистрируется как конечный результат эксперимента, либо используется для определения дальнейшего развития эксперимента. В простейшем случае определяются новые режимы наблюдения, в более сложном случае может существенно изменяться вся последовательность операции, т. е. происходит переход на другую ветвь разветвленного алгоритма. Наконец, может формироваться новая ветвь алгоритма взаимодействия ЭК с объектом. В последнем случае в ЭК должна быть предусмотрена специальная программа, непосредственно не участвующая в обработке информации, но предназначенная для адаптации алгоритма взаимодействия ЭК с объектом. Если априорной информации недостаточно для составления такой программы, то адаптация алгоритма функционирования ЭК к новому этапу эксперимента производится экспериментатором.

В целом алгоритм эксперимента определяется конкретной задачей, но отдельные его блоки, особенно в части математической обработки результатов наблюдений, являются весьма стабильными, программы для выполнения такой обработки входят в прикладное математическое обеспечение большинства вычислительных систем.

Выделение сигнала из помех

Выделение сигнала на фоне помех является наиболее типичным случаем обработки результатов наблюдений. Основным процессом является выделение сигнала известной формы на фоне случайной помехи. В более сложных вариантах форма сигнала неизвестна, но известна форма его составляющих. При наличии детерминированной помехи аналогичные методы предварительно применяются для выделения помехи, которая затем вычитается из наблюдаемой переменной.

В простейшем случае, когда для некоторого множества N значений x_i наблюдаемой величины можно предположить постоянное значение S сигнальной составляющей, выделение сигнала достигается усреднением полученных значений наблюдаемой величины [5.1, 5.2]

$$S = (1/N) \sum_{i=1}^{N} x_i.$$

При определенных допущениях о характере случайной помехи среднее значение является наиболее вероятным для величины сигнала. Отношение сигнал/помеха при вычислении среднего значения увеличивается приблизительно в $\sqrt{N}$ раз, где N — число наблюдений, если наблюдения равноточны. При неравноточных наблюдениях вычисляется средневзвешенное значение

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i p_i}{\sum_{i=1}^{N} p_i},$$

где p_i — вес, определяемый отношением дисперсий отдельных наблюдений. Необходимо отметить, что априорная оценка веса может оказаться сложной проблемой.

В случае, когда значение сигнала S нельзя считать постоянным, но есть основания ожидать, что зависимость подчиняется некоторому закону $\Psi(i)$ и отличается от него лишь постоянным сомножителем A, можно воспользоваться той же формулой усреднения. В предположении равноточных наблюдений наиболее вероятное значение может быть найдено как

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i \Psi_i}{\sum_{i=1}^{N} \Psi_i^2}.$$

Если зависимость $S(i)$ может отличаться от $\Psi(i)$ не только масштабом, но и смещением m, то определить наиболее вероятные значения A и m можно по ряду значений

$$A_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{i-j} \Psi_i}{\sum_{i=1}^{N} \Psi_i^2}$$

для всех возможных j и выбрать затем $A = \max\{A_i\}$ при $m = j$.

Дальнейшее усложнение обработки результатов наблюдений в большинстве случаев является развитием изложенного подхода.

В большинстве случаев высказать обоснованное предположение относительно вида зависимости $\Psi(i)$ оказывается затруднительно. Задача решается представлением зависимости $\Psi(i)$ в виде $\Psi(i) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_k \varepsilon_k(i)$, где $\varepsilon_k(i)$ — ряд функций, ортогональных на интервале наблю-

дения. Коэффициенты α_k определяются по формуле для A_j. При анализе сигналов типичным является выбор в качестве ε_k гармонических функций, что приводит к преобразованию Фурье. Выбор гармонических функций удобен, так как позволяет применить к полученным результатам известные методы анализа электрических систем.

При анализе характеристик объекта, связывающих различные переменные, предпочтительнее использовать другие ряды функций (например, полиномы Лагерра), которые легче сопоставить с конфигурацией электрических схем.

Перечисленные методы обработки сигнала позволяют определять значения переменных, их зависимости от времени и от других переменных, идентифицировать в заданном классе функций характеристики объектов. Могут применяться значительно более сложные методы обработки. Усложнение может быть вызвано:

увеличением размерности задач;

привлечением ряда дополнительных допущений о форме искомой зависимости и о статических характеристиках помех.

В ряде случаев целью эксперимента является нахождение особых режимов объекта, экстремальных участков зависимостей и характеристик. Для этого привлекается ряд математических методов и соответствующих алгоритмов эксперимента. В первую очередь следует отметить применение математических моделей объекта или его отдельных узлов. Исходными данными для моделирования служат результаты начальных этапов эксперимента. В ходе моделирования определяются наиболее интересные для дальнейшего исследования режимы. При этом достигается возможность свободного варьирования режимами и, что особенно важно, характеристиками объекта, в том числе за пределами безопасных для объекта диапазонов. Может быть определена форма ожидаемых в дальнейшем эксперименте зависимостей, что упрощает обработку наблюдений.

Особым случаем является выявление экстремальных режимов объекта, оптимизация его характеристик. Для решения этой задачи используются разнообразные методы поиска экстремума [5.7], методы оптимального планирования отдельных этапов эксперимента [5.5—5.10], обеспечивающие в заданных условиях и принятых допущениях наибольшую точность оценок локальных свойств поверхности отклика.

Следует отметить, что многие алгоритмы обработки результатов наблюдений, особенно при решении задач распознавания образов [5.12, 5.13], анализа изображений и т. п. носят в целом эвристический характер, однако включает в себя в качестве составляющих упомянутые достаточно строгие математические методы.

Планирование эксперимента

При математическом описании и анализе чувствительности технических систем к действию различных факторов широкое применение находят экспериментально-статические методы (методы ПЭ), позволяющие по результатам специально спланированного эксперимента построить математическую модель системы [5.8—5.11].

Цель исследования при этом состоит в нахождении зависимости выходной переменной системы y (основного показателя, интересующего исследователя) от входных переменных (факторов) $x_1, \ldots, x_k$ в виде уравнения связи

$$y_0(x) = f(x_1, \ldots, x_k; \theta_1, \ldots, \theta_m),$$

где $f(\cdot)$ — некоторая функция; θ_i, $i = 1, \ldots m$ — ее параметры.

С учетом неизбежных для любого эксперимента погрешностей измерения и действия неучтенных факторов при проведении испытаний системы исследователь вместо истинной величины $y_0(x)$ получает при фиксированном наборе входных факторов $\mathbf{x} = \|x_1, \ldots, x_k\|$ величину $y(x)$, смешанную с ошибкой эксперимента.

Теория планирования эксперимента (ТПЭ) наиболее развита для случая когда помеха e является случайной, аддитивно приложенной к системе, а функция y_0 является линейной относительно параметров θ_i, т. е. результат эксперимента описывается уравнением

$$y(x) = y_0(x) + e = \sum_{j=1}^{m} \varphi_j(x)\,\theta_j + e.$$

При этом в ТПЭ предлагается, что:

а) случайная помеха имеет нулевое среднее значение и постоянную дисперсию;

б) $\varphi_j(x)$ — известные функции от входных факторов, называемые базисными.

Экспериментом в ТПЭ называется совокупность результатов N опытов

$$x_i = \| x_{1i};\quad x_{2i}; \ldots;\quad x_{ki} \|,$$
$$y_i = y(x_i),\quad i = 1, \ldots, N,$$

в каждом из которых измерено значение выходной переменной при фиксированных значениях (уровнях) входных факторов.

Планом эксперимента ε называется совокупность

$$\varepsilon = \{x_i,\ p_i = n_i/N,\quad i = 1, \ldots, q,\quad x_i \in X\}$$

где x_i — точки плана, т. е. различные комбинации входных факторов (совокупность всех точек плана составляет спектр плана); X — область планирования, определяющая область возможного изменения входных факторов (например, диапазоны их изменения); n_i — число повторений (дублирований) каждой точки спектра плана в эксперименте, причем $\sum_{i=1}^{q} n_i = N$; p_i — частоты плана, характеризующие долю наблюдений в точке.

Таким образом, для выбора плана эксперимента необходимо задать его спектр и частоты (или число повторений n_i в каждой точке x_i).

Если в соответствии с некоторым планом реализован эксперимент, то, используя известные методы, можно определить оценки $\hat{\theta}_j$ неизвестных параметров θ_j и построить регрессионную модель системы в виде

$$\hat{y}(x) = \sum_{j=1}^{m} \varphi_j(x)\,\hat{\theta}_j.$$

При этом точность оценок $\hat{\theta}_j$ характеризуется их дисперсионной матрицей $D(\hat{\theta})$, а точность модели — дисперсией прогноза $d(x)$ $[\pm\sqrt{d(x)}$ определяет коридор ошибок при прогнозировании выходной переменной y при фиксированных входных факторах $x_1, \ldots, x_k]$.

В ТПЭ показано, что при сделанных выше допущениях характеристики точности модели $D(\hat{\theta})$ и $d(x)$ зависят от выбранного плана эксперимента ε и с точностью до постоянного множителя могут быть вычислены до проведения эксперимента над системой, т. е. априори. Это обстоятельство позволяет заранее рассчитывать и выбирать оптимальные планы эксперимента (априорные).

При построении модели системы $\hat{y}(x)$ исследователь сталкивается с необходимостью решения следующих задач.

1. Отбор существенных переменных (факторов) и определение структуры модели. На этом слабо в настоящее время формализованном этапе исследования необходимо отобрать по возможности наименьшее число входных факторов $x_1, \ldots, x_k$, оказывающих влияние на выход системы y. Среди отобранных факторов $x_1, \ldots, x_k$ не должно быть линейно зависимых (в частности, однозначно выражаемых через другие). Кроме того, диапазоны их изменения должны быть достаточно большими, чтобы изменение входной переменной y при изменении фактора x_i можно было обнаружить на фоне ошибок измерения и помех

При определении структуры модели, т. е. при выборе базисных функций $\varphi_j(x)$, $j=1, \ldots, m$, используют различные априорные сведения и теоретические соотношения, справедливые для изучаемой системы.

2. Определение оптимального априорного плана эксперимента, предполагает обоснованный выбор критерия оптимальности, который зависит от конечной цели исследования.

а) Если самостоятельный интерес представляют параметры θ_j (например, как коэффициенты влияния), то критерий выбирают зависящим от дисперсионной матрицы $D\hat{\theta}_j$. В частности, широкое распространение получили критерии

$$D = \det D(\hat{\theta}); \qquad A = \operatorname{Sp} D(\hat{\theta});$$

где $\det D(\hat{\theta})$ — определитель дисперсионной матрицы; $\operatorname{Sp} D(\hat{\theta})$ — ее след, равный сумме диагональных элементов.

Планы, минимизирующие критерии, называются соответственно D- и A-оптимальными.

б) Если главная цель состоит в наиболее точном прогнозе показателя y при фиксированном наборе входных факторов, то целесообразно использовать планы, минимизирующие критерии

$$G = \max d(x); \qquad Q = \int_X d(x)\,dx,$$

связанные с дисперсией прогноза. Указанные планы называются G- и Q-оптимальными.

в) Если цель состоит в нахождении экстремума показателя $y(x_0 = \arg\operatorname{extr} \hat{y}(x))$, что требует наиболее точной оценки вектор-градиента, целесообразно использовать R_G и R_Q— оптимальные планы, обеспечивающие наименьшую дисперсию вектор-градиента $\partial\hat{y}(x)/\partial x$, вычисленного по регрессионной модели.

В настоящее время разработаны пакеты программ для численного синтеза указанных выше оптимальных планов на ЭВМ и составлены каталоги для наиболее употребительных моделей (в частности, полиномиальных).

3. Проведение эксперимента в соответствии с выбранным оптимальным планом осуществляется путем проведения измерений на системе. При этом для исключения систематических ошибок необходимо провести рандомизацию опытов, т. е. обеспечить случайную последовательность их реализации.

4. Построение модели системы $\hat{y}(x)$ осуществляется путем обработки данных на ЭВМ с использованием программ регрессионного анализа на основе метода наименьших квадратов, метода главных компонентов и гребневой регрессии или с использованием программы конфлюентного анализа [5.11].

5.5. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Процесс в объекте эксперимента описывается на основе априорной информации как некоторая модель в общепринятых терминах, соответствующих определенным физическим переменным. Из невозможности независимого измерения или задания значений переменных во всех точках пространства и времени вытекает необходимость введения обоснованной аппроксимации реального поля значений переменной некоторой функцией и задания для выбранной функции некоторых параметров-функционалов. В технических объектах обычно имеются традиционные варианты аппроксимации (постоянный и переменный ток, синусоидальные переменные, прямоугольные импульсы и т. д.) и традиционные варианты функционалов (действующее значение, среднее по модулю значение и т. п.).

При проведении эксперимента необходимо тщательно проверять обоснованность выбора аппроксимации и функционалов, ее характеризующих. Это обусловлено тем, что эксперимент принципиально предполагает создание некоторой новой неисследованной, нестандартной ситуации, в которой традиционный подход не будет оправдан.

Для аппроксимации любой зависимости необходимо иметь исходные сведения о возможных значениях переменной в каких-то точках пространства и времени. В свою очередь, эти значения также являются функционалами, характеризующими какую-то более фундаментальную для данного объекта зависимость. Таким образом, на каком-то уровне описание процессов в объекте по необходимости становится в пределах данной задачи аксиоматическим.

Вводимая для данного эксперимента аппроксимация должна:

описывать реальное распределение переменной в пространстве и времени «хорошо» в заранее определенном и обоснованном смысле (например, в смысле среднего или среднеквадратического отклонения);

допускать достаточно простую параметризацию;

быть удобной для обработки принятыми в данном эксперименте способами (например, при аналитическом преобразовании получаемых зависимостей их удобнее аппроксимировать элементарными функциями, причем именно теми, которые допускают легкое решение возникающих уравнений, при использовании вычислительных методов может оказаться удобнее кусочно-линейная аппроксимация).

Принятый набор параметров должен удовлетворять ряду требований:

1. Быть минимальным и в то же время достаточно полно характеризовать параметризуемую функцию.

2. Сохранять определенность или, по крайней мере, допускать приемлемую в данном эксперименте модификацию при возможных в рассматриваемом случае вариантах параметризуемой функции. Простейшим примером может быть действующее значение переменного напряжения, определенное однозначно для периодических сигналов. Реальный сигнал всегда непериодический, зачастую сильно отличается от периодических, и в этих случаях понятие действующего напряжения во избежание бессмысленных измерений и преобразований должно быть переопределено для конкретного эксперимента.

3. Допускать измерение всех используемых параметров общепринятыми методами, либо обеспеченными поверкой, либо допускающими калибровку по частной методике в ходе эксперимента.

4. Допускать достаточно ясную интерпретацию показаний измерительных приборов в ситуациях, отличных от поверочных или калибровочных. Примером может быть уже упомянутое действующее значение напряжения — вольтметр действующего значения дает показания независимо от соответствия измеряемого сигнала требованию периодичности.

Фактически при этом будет индицироваться некоторое средневзвешенное значение [5.1, 5.2]. Следует отметить, что правильную интерпретацию показаний измерительных приборов в нестандартных ситуациях по их практическим описаниям зачастую сделать невозможно, для этого может потребоваться анализ принципа преобразования и схемы прибора.

Некритичное заимствование аппроксимирующих функций или набора параметров может крайне затруднить проведение эксперимента в смысле подбора измерительных преобразователей, интерпретации их показаний, обработки результатов и их истолкования.

В то же время неоправданный отказ от общепринятых аппроксимаций и систем параметров также может осложнить выбор средств измерения и затруднит обсуждения, оценку и внедрение результатов эксперимента, что для технических исследований недопустимо.

Особо следует отметить частный, но очень распространенный случай обнаружения сигнала по его изменению (или появлению). В этом случае результатом наблюдения является двоичная переменная (есть—нет). При этом основным требованием к контролируемому параметру наблюдаемого процесса является его чувствительность к сигналу и малая чувствительность к другим воздействиям.

Для электротехнического эксперимента наиболее важными являются значения токов и напряжений, определяемых при описании объекта для различных точек подключения. Следует учитывать, что уже на этом уровне аппроксимации реального электромагнитного процесса необходим критический анализ модели. Достаточно строгое применение понятий ток и напряжение возможно лишь в ограниченном диапазоне значений переменных и их частотного состава. При малых (до 10^{-9}) и больших (свыше 10^{3}) значениях тока (А) и напряжения (В) и при частотах более 10^{6} Гц большинство объектов для обеспечения погрешности порядка 10^{-3} требует описания не в терминах электрических цепей, а в терминах теории поля. При очень малых токах (до 10^{-15} А) начинает сказываться дискретность электрических зарядов. В конкретных технических задачах для сохранения определенности без усложнения модели объекта при измерении очень малых и очень больших значений переменных применяют специальные методы, исключающие влияние распределенных пространственных характеристик среды [5.14]. Однако необходимо учитывать, что применение любого специального (искусственного) приема сужает применимость полученной характеристики процесса. Например, при использовании в технике измерений малых токов метода эквипотенциальной экранировки понятие «ток в цепи» нельзя использовать иначе как с оговоркой «при наличии эквипотенциального экрана с заданным вариантом его подключения».

Классические варианты аппроксимаций временных зависимостей (постоянный, переменный, синусоидальный ток) в современных системах зачастую уступают место импульсным сигналам, форма которых не поддается простой аппроксимации. Параметризация импульсных сигналов идет обычно путем аппроксимации наблюдаемой зависимости последовательностью характерных точек. При этом выбор уровней отсчета и моментов фиксаций значений должен обеспечить, с одной стороны, соответствие реальным режимам работы данного конкретного устройства в конкретной системе, с другой — возможность сравнения с аналогичными объектами. Характерным примером является параметризация сигналов логических элементов по уровням 0 и 1, заданным в конкретном комплексе элементов, и параметризация таких же сигналов по уровням $0{,}1U_m$; $0{,}9U_m$ в исследовательских работах, где основным требованием является сопоставимость результатов при разных объектах и исполнителях анализа.

Весьма существенные ограничения на выбор параметров накладывает номенклатура приборов. Так, хотя для полного описания синусоидальных токов и напряжений необходимо (при заданной частоте) иметь два параметра: A_x и φ_x или Re_x и Im_x, при построении ЭК обычно приходится ограничиваться измерением одного амплитудного параметра в связи с

очень малой распространенностью анализаторов переменного тока. При измерении импульсных напряжений, как говорилось выше, в каждом классе объектов вводится своя система параметров. Весьма перспективным можно считать параметризацию импульсов по интегральному значению, по энергии (по среднеквадратическому значению), по обобщенной амплитуде [5.15], однако измерение таких параметров слабо обеспечено измерительными приборами.

При анализе в ходе экспериментов нескольких переменных в объекте для последующего определения его характеристик выбор параметров наблюдаемых величин ограничивается кроме вышеуказанных причин требованием соответствия или достаточной аналогии между математическим процессом образования функционала при определении параметра и математической моделью воздействия переменной на элементы и структуры исследуемого объекта. Так, тепловое воздействие электрического сигнала однозначно требует параметризации его по действующему значению независимо от удобства измерения и обработки этого параметра. Следует отметить, что в ряде случаев возможен переход от одного варианта параметризации, удобной на этапе первичной обработки сигнала, к другому варианту параметризации, более соответствующему модели процесса в объекте или более удобному для использования на последующих этапах эксперимента.

5.6. ОСОБЕННОСТИ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ (ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ)

Проблема параметризации объекта исследования, его электрических характеристик при постановке эксперимента является одной из важнейших для согласования исходных данных в части соответствия посылок проверяемой гипотезы, модели объекта и возможностей средств измерения и обработки информации.

Можно выделить три направления выбора аппроксимации и параметризации характеристик электрических цепей объекта.

1. Анализ физических процессов в объекте позволяет на основании фундаментальных физических представлений построить математическую модель объекта (см. разд. 7). Во всех реальных случаях такая модель создается ценой очень существенных упрощений и для технических устройств очень редко допускает количественный расчет внешних характеристик. Тем не менее вид функций, получаемых при построении математической модели объекта, может быть использован при аппроксимации реальных характеристик. Параметрами характеристик при этом являются параметры функций, ранее полученных из физических постоянных, и характеристик отдельных элементов исследуемого устройства. Однако значения этих параметров теперь получаются из экспериментальных данных для объекта в целом. Интерпретировать получаемые значения параметров как действительные решения системы уравнений математической модели обычно невозможно из-за трудности оценки влияния принятых допущений, т. е. в этом смысле модель неадекватна объекту. Тем не менее качественное влияние вариаций режимов, изменений характеристик отдельных элементов, изменений стимулирующих воздействий при такой полуэмпирической параметризации может прогнозироваться достаточно хорошо. Недостатками аппроксимации характеристик на основе математической модели физических процессов в объекте исследования могут быть: сложность или недостаточная точность определения параметров функций по экспериментальным данным; трудность использования сложных математических зависимостей в инженерных расчетах.

2. Физическая картина процессов в объекте исследования не учитывается. Аппроксимация характеристик и их параметризация выбираются из удобства дальнейшего использования в инженерной практике. Здесь, в первую очередь следует упомянуть введение линеаризованных характеристик, которые крайне редко могут получить какое-либо физическое обоснование, но исключительно удобны в расчетах. Реже применяются степенные и экспоненциальные ряды — такая аппроксимация необходима, если нелинейностью характеристик в данном эксперименте пренебречь нельзя. Следует отметить, что степенные и экспоненциальные ряды с приемлемым количеством членов обычно обеспечивают достаточную точность аппроксимации практически встречающихся нелинейных зависимостей.

3. В случаях, когда объект исследования является техническим устройством с совершенно конкретным назначением, может возникнуть необходимость параметризовать характеристики через значения вполне определенных переменных в основных рабочих режимах — «то точкам».

Такая параметризация может быть весьма неудобна как для анализа процессов в объекте, так и для математической обработки и последующего расчета. Определяющими для выбора такой параметризации могут быть два обстоятельства:

наглядность получаемых результатов, доходчивость выводов, простота сравнения полученных оценок с практически наблюдаемыми в эксплуатационном процессе, легкость согласования получаемых инженерных рекомендаций с технической документацией;

наличие развитой системы средств испытаний и измерений, позволяющих провести эксперимент с минимальными затратами, но допускающих измерение только определенных переменных в нормированных условиях.

Описанные подходы можно проиллюстрировать следующими примерами.

При исследовании процессов в полупроводниковых структурах обычно строится математическая модель на основе представлений о процессах диффузии носителей в полупроводнике, решение системы уравнений получается в простейшем случае в виде экспонент, параметры которых связаны со свойствами полупроводника. Та же структура в расчетах схем описывается преимущественно в параметрах линейной аппроксимации, связь которых с физической моделью весьма слаба. Наконец, в паспорте полупроводникового прибора указываются чаще всего значения токов и

напряжений в конкретных режимах, из которых не всегда можно получить параметры линейной аппроксимации и тем более параметры физической модели.

При анализе процессов формирования сигналов в импульсных устройствах решение систем уравнений, описывающих переходный процесс в формирователе, обычно дает экспоненциальные зависимости, параметры которых определяются значениями сопротивлений, индуктивностей, емкостей и т. д. При рассмотрении прохождения сформированного импульса по схеме обычно удобнее принять более примитивную кусочно-линейную аппроксимацию (трапецеидальный импульс, прямоугольный импульс). Наконец, для конкретной элементной базы какого-либо вычислительного устройства все сигналы параметризуются по условным уровням «логический 0», «логическая 1».

Особо следует отметить задачу учета внешних влияний в системе параметров объекта. Такими внешними влияниями могут быть воздействие температуры, давления, питающих напряжений и т. п. Выражение «внешние влияния» весьма условно, но в большинстве случаев для нормально функционирующих объектов характерно относительно малое изменение параметров при внешних влияниях. Воздействие внешних влияний на процессы в объекте обычно идет по множеству каналов, анализ которых затруднен. Учет внешних влияний производится, как правило, введением математической зависимости простейшего вида — линейной, квадратичной или кубичной.

5.7. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Структура автоматизированного экспериментального комплекса

В современном научном и техническом эксперименте все чаще имеют дело с большими потоками информации. Это связано со сложностью объектов эксперимента, высокой скоростью исследуемых процессов, повышением требований к точности и разрешающей способности экспериментальной установки. При этом часто восприятие, транспортировку, обработку и отображение больших информационных потоков, необходимых для принятия решения по управлению экспериментальной установкой, приходится выполнять при ограниченном режимом работы исследуемого объекта ресурсе времени. Объединенные в систему технические средства и методы, позволяющие реализовать комплексную автоматизацию эксперимента, называют автоматизированным экспериментальным комплексом (АЭК) [5.21]. Типовая укрупненная структурная схема АЭК, реализующая вышеперечисленные функции, показана на рис. 5.8.

При автоматизации экспериментальных исследований особо остро встает вопрос о создании гибких систем, инвариантных в определенных классах экспериментов (например, электротехнических), обеспечивающих возможность перестройки для выполнения новых экспериментальных исследований с минимальными затратами времени и средств.

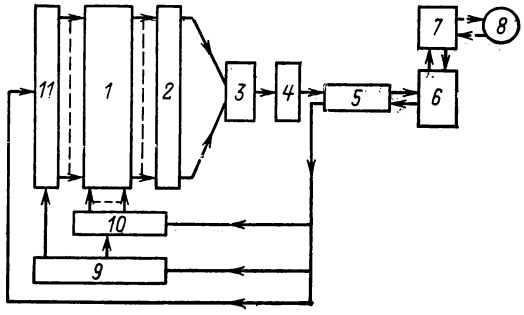


Рис. 5.8. Структурная схема типового АЭК:

1 — объект эксперимента; *2* — измерительные преобразователи; *3* — коммутатор; *4* — средства преобразования и первичной обработки информации; *5*—канал связи; *6* — ЭВМ; *7* — устройство отображения информации; *8* — экспериментатор; *9* — цифро-аналоговый преобразователь; *10* — исполнительные механизмы; *11* — генератор стимулирующих воздействий

Управляющие и вычислительные функции ЭВМ в АЭК

Автоматизация процессов работы экспериментального комплекса основана на применении ЭВМ в качестве одного из его компонентов. ЭВМ дает возможность:

освободить экспериментатора от рутинной работы по сбору и регистрации экспериментальной информации, повысив при этом ее достоверность из-за устранения субъективных ошибок;

ставить эксперименты, которые без ЭВМ практически не могли быть выполнены из-за эргономических ограничений, например получать информацию одновременно от большого числа измерительных преобразователей;

осуществлять оперативную обработку информации (экспресс-анализ) с целью получения системы статистических оценок, необходимых экспериментатору для принятия решения о продолжении программы эксперимента или ее корректировке;

реализовывать адаптивные алгоритмы эксперимента, поручив ЭВМ частичное выполнение эвристических функций, свойственных человеку (принятие решений на основании полученной и обработанной информации в условиях неопределенности);

решать задачи по обработке информации, требующие больших объемов вычислительных работ, например обработка результатов многофакторных экспериментов; обработка, связанная с обращением матриц большой размерности (до 10^8 элементов);

вести обработку экспериментальной информации в режиме реального времени, под которым понимают режим, характеризуемый следующими основными чертами: управление обработкой данных осуществляется со стороны источника информации, обработка выполняется за время, в течение которого в исследуемом процессе не могут произойти изменения, влияющие на его ход;

объединить в одной экспериментальной процедуре натурный и вычислительный эксперимент: на основе модели, полученной с помощью натурного эксперимента, в вычислительном эксперименте на ЭВМ (имитационное моделирование) исследуется поведение объекта в режиме, не охваченном натурным экспериментом, определяются наиболее интересные режимы, на которые в дальнейшем нацеливается натурный эксперимент.

Основные задачи автоматизации ЭК, решение которых базируется на применении ЭВМ, могут быть сформулированы следующим образом:

сбор, передача, регистрация и отображение экспериментальных данных;

управление режимом работы отдельных компонентов АЭК;

управление ходом эксперимента в соответствии с алгоритмом, реализующим план эксперимента;

экспресс-обработка экспериментальных данных в процессе эксперимента, необходимая для контроля за ходом эксперимента и принятия экспериментатором того или иного решения;

окончательная обработка экспериментальных данных;

имитационное моделирование процесса эксперимента с целью анализа стимулирующих воздействий и внешних влияний на модель объекта эксперимента, полученную на основании неполной априорной информации;

создание баз данных, соответствующих тому или иному эксперименту.

Для реализации вышеуказанных возможностей и решения перечисленных задач в АЭК применяют ЭВМ различного типа: микро-ЭВМ и микропроцессорные наборы, мини-ЭВМ, средние и большие ЭВМ, гибридные вычислительные системы (ГВС), многопроцессорные вычислительные системы (МВС). Основные характеристики вычислительных средств и особенности их архитектуры см. в разд. 8.

Прежде всего следует отметить, что для автоматизации процесса сбора и регистрации информации, работы генераторов стимулирующих воздействий и другого экспериментального оборудования, реализующих несложный автономный эксперимент или часть сложного, где основной функцией ЭВМ является управление, а математическая обработка выполняется самая элементарная, не предусматривается вообще или выполняется другой ЭВМ, следует применять наиболее соответствующую по своим характеристикам для целей управления микро-ЭВМ.

Для управления ходом эксперимента всего АЭК, в состав которого могут входить и подсистемы, управляемые микро-ЭВМ, наиболее подходят по своим характеристикам мини-ЭВМ. Этот класс машин применяют также в том случае, когда процесс управления связан со значительной математической обработкой, например для управления в режиме реального масштаба времени требуется оценка каких-либо статистических параметров.

Большие ЭВМ следует включать в экспериментальный комплекс в том случае, когда проведение экспериментов связано с большим объемом вычислительной работы: теоретическими расчетами на этапе подготовки эксперимента, имитационным моделированием, математической обработкой по сложным алгоритмам как в ходе эксперимента, так и на этапе обработки экспериментальных данных.

Следует иметь в виду, что использовать большую ЭВМ, обладающую высокой производительностью и большим объемом ОЗУ, для целей управления, как правило, не рационально, поэтому даже в ходе эксперимента она используется в основном в качестве вычислителя.

При постановке сложных экспериментов может иметь место ситуация, когда необходимо одновременно и за короткий интервал времени провести обработку информации с некоторого множества точек объекта эксперимента, каждая из которых характеризуется какой-то совокупностью параметров. Такой режим обработки, когда одна команда выполняется одновремено над множеством данных, называется режимом параллельной обработки. Для реализации этого режима лучше всего подходят многопроцессорные вычислительные системы.

Архитектура АЭК

Класс решаемых АЭК задач во многом определяет его структуру (набор технических средств и связи между ними), программное (набор программ, обеспечивающих функционирование системы и выполнение алгоритма эксперимента) и математическое (пакет прикладных программ, обеспечивающих требуемую обработку экспериментальных данных) обеспечение. Совокупность аппаратных, программных и математических средств, определяющих возможности системы и ее основные характеристики, обозначают понятием «архитектура». С точки зрения архитектуры АЭК можно подразделить на: 1) иерархические, 2) сетевые, 3) с параллельной обработкой данных.

Иерархические АЭК. АЭК этого типа нашли наибольшее применение в практике. Они делятся на одноуровневые, двухуровневые, трехуровневые.

Одноуровневые АЭК. Основой автоматизации одноуровневого АЭК, как правило, служит микро-ЭВМ или при достаточно сложном алгоритме эксперимента мини-ЭВМ, на которые возлагаются функции сбора и регистрации экспериментальной информации (иногда может быть предусмотрена простейшая ее обработка), а также управления работой экспериментального оборудования и генераторов стимулирующих воздействий. Задача ЭВМ в одноуровневых АЭК состоит в освобождении экспериментатора от однообразной и утомительной работы по переключению коммутирующих устройств, снятию показаний измерительных приборов, обеспечению функционирования экспериментального оборудования и генераторов стимулирующих воздействий. Типовая схема одноуровневого АЭК показана на рис. 5.9. Алгоритм функционирования такой системы однозначно определен, его изменение в ходе эксперимента не предусматривается. Модификация программы, реализующей алгоритм эксперимента, или ее корректировка осуществляется на какой-то другой универсаль-

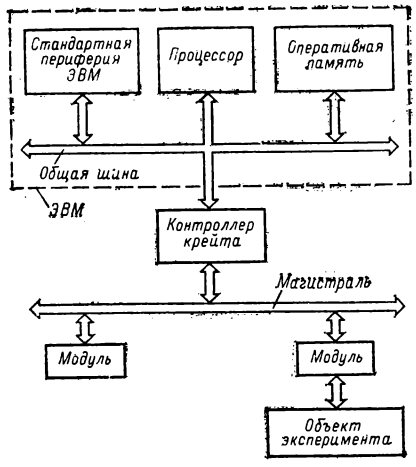


Рис. 5.9. Структурная схема одноуровневого АЭК

ной ЭВМ с помощью кросс-средств: компилятора, преобразующего программу на языке высокого уровня в программу на языке ассемблера; кроссассемблера, транслирующего программу, записанную на символическом языке, в объективную программу микро-ЭВМ; эмулятора, моделирующего функционирование микропроцессора на ЭВМ.

Связь ЭВМ с другими компонентами АЭК осуществляется с помощью стандартной интерфейсной системы (см. ниже).

Регистрация экспериментальной информации может быть организована непосредственно в запоминающем устройстве ЭВМ или в автономном накопителе. В качестве накопителей могут применяться регистрирующие устройства различного типа: магнитные, перфораторные, цифропечатающие, самопишущие приборы, светолучевые осциллографы. Наиболее широкое применение в АЭК получили магнитные накопители. Применяемые магнитные накопители могут быть одноканальными и многоканальными, носителем массивов информации в них является магнитная лента или диск, поступающая после проведения эксперимента на обработку. Они могут регистрировать информацию как в аналоговой, так и в цифровой форме. Применение перфораторных накопителей, регистрирующих только цифровую информацию пробивкой кодовых комбинаций на бумажной ленте, обусловлено удобством ввода ее в ЭВМ.

Подключение аппаратуры АЭК к объекту эксперимента выполняется с помощью специальных устройств: адаптеров и коммутаторов. Адаптеры предназначаются для механического и электрического подсоединения к объекту эксперимента. Их свойства и конструкции определяются конструктивными и электрическими особенностями точек подключения. Коммутаторы предназначены для подключения выходов измерительных преобразователей к цифроаналоговому преобразователю (ЦАП) или к каналу передачи, если информация на коммутатор поступает в цифровой форме, или выходов генераторов стимулирующих воздействий и устройств управления экспериментальным оборудованием к ЦАП, если они управляются аналоговым каналом, или непосредственно к каналу передачи информации от ЭВМ, если они имеют цифровое управление. В настоящее время известен большой выбор коммутаторов, отличающихся элементной базой (электромеханические, электронные, оптоэлектронные), функциональными возможностями (10^2—10^7 переключений в секунду), схемами переключения (линейные, матрифные, пирамидальные) и техническими параметрами [5.18].

Одноуровневые АЭК могут использоваться как в автономном режиме, так и в качестве подсистем нижнего уровня многоуровневых иерархических АЭК.

Двухуровневые АЭК имеют два иерархических уровня: нижний и верхний. Нижний иерахический уровень включает в себя, как правило, несколько одноуровневых АЭК, а также может включать наборы оборудования, объединяемые интерфейсными системами и управляемые контроллерами.

На верхнем уровне обычно находится мини-ЭВМ, на которую возлагаются следующие основные функции:

координирование работы подсистем нижнего иерархического уровня;

регистрация массивов данных, получаемых от подсистем нижнего уровня;

обработка экспериментальной информации в ходе эксперимента, в том числе в реальном времени;

отображение информации;

создание, корректировка и модернизация программ для микро-ЭВМ комплекса.

Структура и режим работы подсистем нижнего уровня описан в предыдущем пункте (см. рис. 5.9).

Основными особенностями режима работы ЭВМ высшего иерархического уровня двухуровневого АЭК являются наличие оперативной связи между экспериментатором и ЭВМ, а также возможность выполнения математической обработки экспериментальной информации в реальном времени. Основой системы оперативной связи (СОС), включающей в себя подсистемы отображения, ввода информации в ЭВМ и управления работой СОС со стороны экспериментатора, является алфавитно-цифровой или графический видеотерминал, выполненный на электронно-лучевой трубке (дисплей). Подсистема отображения информации включает в себя блок индикации, выходом которого служит экран дисплея. Для регистрации информации, выведенной на экран, в этой подсистеме могут быть предусмотрены печатающее устройство и графопостроитель. Входом подсистемы ввода информации служит алфавитно-цифровая и знаковая клавиатуры, а у графических дисплеев — устройство типа «световое перо», позволяющее корректировать информацию, выведенную на экран, и вводить новую.

Обмен информацией между экспериментатором и ЭВМ осуществляется в форме диалога в асинхронном режиме, характеризующемся переменными временными интервалами, по принципу запрос—ответ. Диалог может быть инициирован как экспериментатором, так и ЭВМ.

Работа АЭК в реальном времени обеспечивается операционной системой реального

времени и имеет ряд особенностей, которые заключаются в следующем:

управление системой обработки информации осуществляется источником информации;

ЭВМ работает в течение всего эксперимента независимо от степени ее загрузки;

к средствам обработки и передачи информации предъявляются повышенные требования с точки зрения быстроты реакции на запрос, производительности и надежности.

Трехуровневые АЭК имеют три уровня автоматизации (рис. 5.10). На нижнем уровне находятся базирующиеся в основном на микро-ЭВМ локальные системы автоматизации, основной задачей которых является управление экспериментальным оборудованием и сбор информации. На втором уровне автоматизации находятся мини-ЭВМ, каждая из которых объединяет несколько локальных систем. Задачей систем второго уровня является выработка установок, определяющих режим работы локальных систем, управление ходом эксперимента, обработка, регистрация и отображение информации. На третьем уровне автоматизации находится ЭВМ, способная выполнять большой объем вычислительных работ. Режимы работы подсистем первого и второго уровней и их особенности и назначение описаны в двух предыдущих пунктах. ЭВМ третьего уровня предназначена в основном для выполнения вычислительных работ: окончательной математической обработки экспериментальных данных, решения задач, использующих информацию второго уровня, имитационного моделирования, теоретических расчетов при подготовке эксперимента. Использовать ее для целей управления не рационально, за исключением тех случаев, когда мини-ЭВМ второго уровня не обеспечивает объем вычислительной работы, необходимый для эффективного управления системой второго уровня, работающей в режиме реального времени. Для ЭВМ третьего уровня характерна многопрограммная работа в режиме разделения времени с многократными переходами от задачи к задаче и возможностью диалога, который может вести с данной ЭВМ экспериментатор или ЭВМ низшего уровня. При этом следует отметить, что одновременно решаемые экспериментальные задачи различаются по степени срочности. Например, задача, обеспечивающая режим реального времени, имеет более высокую степень срочности по сравнению с задачей имитационного моделирования или задача, необходимая для принятия решения экспериментатором в ходе эксперимента, имеет более высокую степень срочности по сравнению с задачей по обработке какого-либо результата эксперимента и т. д. В связи с этим ЭВМ третьего уровня должна приступать к решению задачи по запросу, распознавать срочность запроса, переходить от одной программы к другой в соответствии с этой срочностью, другими словами, иметь развитую систему прерываний и приоритетов [5.19].

АЭК на базе сети ЭВМ. В некоторых случаях технически и экономически более выгодно создавать АЭК на базе ЭВМ, объединенных не в иерархическую систему, а в сеть, под которой понимают объединение равноправных (несоподчиненных) как однородных (однотипных), так и разнородных ЭВМ (рис. 5.11). Такое объединение позволяет иметь распределенный по всей совокупности ЭВМ банк данных, пользоваться взаимными услугами по обработке экспериментальной информации, провести разумную специализацию ЭВМ сети на тот или иной вид обработки информации.

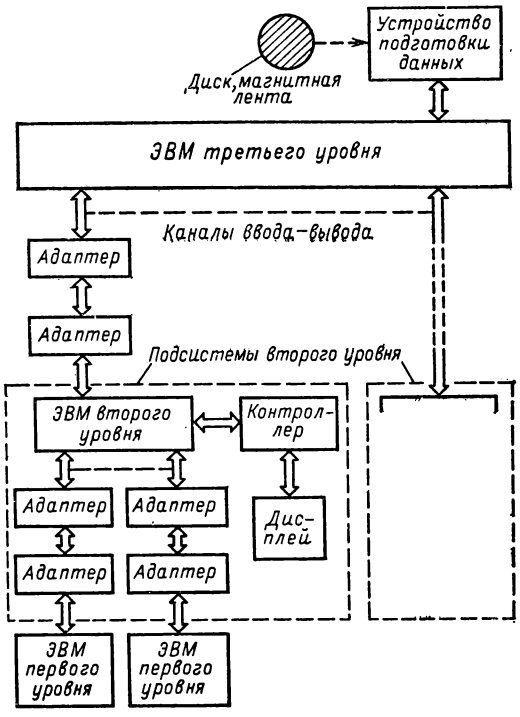


Рис. 5.10. Структурная схема трехуровневого АЭК

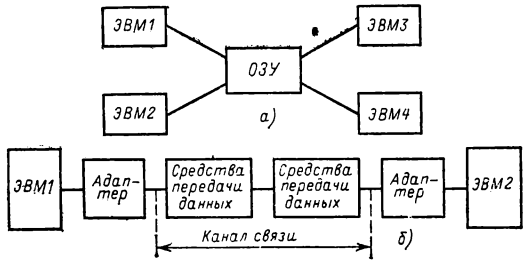


Рис. 5.11. Структура связей между ЭВМ сетевого АЭК

а — с помощью оперативной памяти; *б* — с помощью адаптеров

Объединение ЭВМ в сеть может быть выполнено различными методами. Наиболее распространенными являются два следующих:

1) объединение с помощью ОЗУ, куда каждая ЭВМ может посылать массив данных или сообщение, адресованное любой другой ЭВМ, и считывать массивы данных или сообщения, адресованные ей самой (рис. 5.11, *а*);

2) объединение какого-либо канала одной ЭВМ с каким-либо каналом другой через специальное устройство — адаптер канал—канал, предназначенный для обеспечения информационной совместимости (рис. 5.11, *б*).

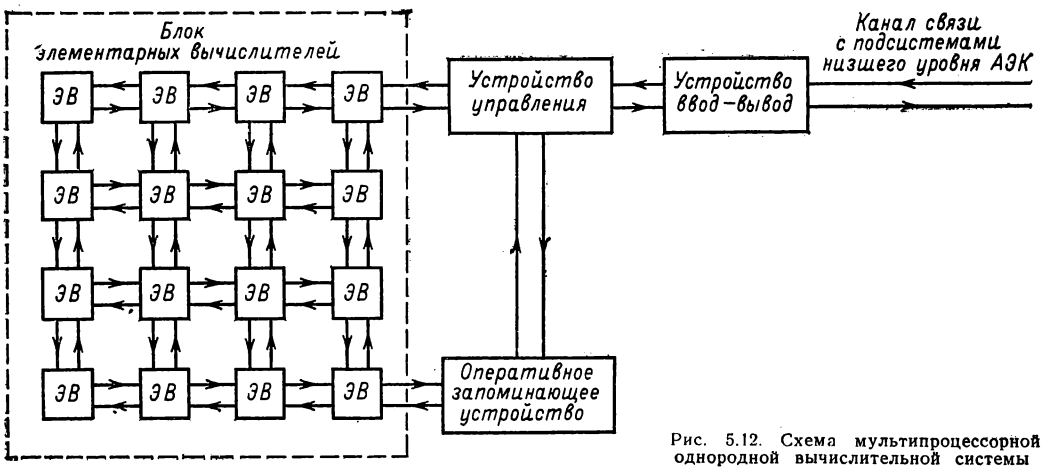


Рис. 5.12. Схема мультипроцессорной однородной вычислительной системы

АЭК с параллельной обработкой данных. При обработке экспериментальных данных часто имеет место следующая типовая задача: выполнить вычисления по одному и тому же алгоритму через определенные интервалы времени для множества точек, представляющих объекты эксперимента и характеризуемых некоторым набором величин, причем обработку необходимо вести в реальном времени при большой скорости исследуемых процессов.

Решение такой задачи предъявляет повышенные требования к производительности вычислительных средств АЭК. Высокая производительность может быть достигнута двумя путями: за счет повышения быстродействия компонентов, из которых они выполнены, и за счет развития архитектуры. Что касается быстродействия компонентов, то здесь возможности ограничены, поэтому основным резервом повышения производительности вычислительных средств остается архитектура.

Наиболее перспективным архитектурным решением с точки зрения применения в АЭК являются вычислительные системы, в которых один поток команд выполняется над многими наборами данных. В основе построения таких систем лежат следующие основные принципы: параллельность, перестраиваемость, однородность.

Принцип параллельности, заключающийся в одновременном (параллельном) выполнении вычислительных или логических операций, направленных на решение одной и той же задачи, является одним из основных факторов повышения быстродействия вычислительных средств. Принцип перестраиваемости, сущность которого заключается в изменении количества однородных элементов вычислительной системы, связей между ними и их архитектуры, обеспечивает адаптивность системы к решению задач различных классов и ее живучесть.

Принцип однородности, заключающийся в создании вычислительной системы из однотипных элементов и связей между ними, обусловливает высокую технологичность производства, низкую стоимость, облегчает организацию взаимодействия элементов, создание программного обеспечения и техническую эксплуатацию.

Вышеуказанные принципы и архитектурное решение наиболее эффективно реализуются с помощью однородных вычислительных систем (ОВС). В качестве примера такой реализации на рис. 5.12 приведена структурная схема ОВС матричного типа. Эта ОВС представляет собой двумерную сеть, состоящую из элементарных вычислителей (ЭВ), соединенных каналами связи и управляемых центральным процессором. Каждый элементарный вычислитель включает в себя универсальный или специализированный процессор, предназначенный для выполнения вычислительных операций; системное устройство, осуществляющее операции обмена, управления и настройки; программируемый коммутатор каналов связи, реализующий разнообразные конфигурации связей.

Системы ввода-вывода ЭВМ

Для эффективной работы АЭК важное значение имеет рациональная организация обмена информацией между ЭВМ и непосредственно связанными с ней внешними устройствами (ВУ). Этот обмен осуществляется с помощью системы ввода-вывода информации. Следует подчеркнуть, что системы ввода-вывода реализуются с помощью унифицированных и стандартизированных технических и программных средств.

Система ввода-вывода больших ЭВМ. В больших ЭВМ каждый из каналов, образующих эту систему, по существу, является специализированной управляющей ЭВМ. Центральный процессор дает только команду о начале работы, а затем всеми операциями ввода-вывода управляет канал. Каналы у больших ЭВМ бывают двух типов: селекторные и мультиплексорные.

Селекторный канал служит для управления высокоскоростными операциями ввода-вывода. Этот канал в каждый момент времени может осуществлять обмен только с одним ВУ (монопольный режим). Для передачи данных устанавливается логическая связь между каналом и ВУ. Эта связь поддерживается в течение всей операции по передаче данных.

Мультиплексорный канал предназначен для организации связи ЭВМ с медленно действующими устройствами. Он может содер-

жать до 256 подканалов и может осуществлять операции передачи данных во всех подканалах одновременно. Каждое ВУ подключается к мультиплексорному каналу на относительно короткие промежутки времени (сеансы связи), когда ему требуется передать какую-либо информацию: код команды, байт данных, байт состояния. Сеансы связи с различными ВУ чередуются в зависимости от их готовности и относительных приоритетов.

Система ввода-вывода мини-ЭВМ. Эта система включает в себя каналы двух типов: программный канал (ПК) и канал прямого доступа (КПД) к оперативной памяти.

ПК может работать в двух режимах: режим программно-управляемого ввода-вывода и режим ввода-вывода по прерываниям.

При программно-управляемом вводе-выводе все основные функции по организации ввода-вывода осуществляет центральный процессор (ЦП). Основным недостатком программно-управляемого режима работы является очень низкая эффективность использования ЦП, так как во время ввода или вывода данных ЦП занят только этой операцией и значительную часть времени находится в ожидании состояния готовности ВУ.

Режим работы АЭК ввод-вывод по прерываниям позволяет значительно повысить эффективность использования ЦП. Для реализации этого режима в устройстве сопряжения предусматривается модуль управления прерываниями. Ввод-вывод данных осуществляется следующим образом. ЦП в соответствии с программой определяет момент начала передачи и посылает сигнал в ВУ. Затем пока ВУ готовится к операции ввода или вывода ЦП продолжает выполнение текущей программы. После подготовки ВУ к выполнению операции устройство управления прерываниями посылает сигнал прерывания в ЦП, которым последний прерывает выполнение текущей программы и начинает операцию ввода или вывода. Таким образом, ЦП освобождается от функций управления ВУ, при этом он может работать с несколькими ВУ одновременно, а очередность реализации операции ввод-вывод различными ВУ определяется их приоритетом.

Режим прямого доступа в оперативную память позволяет связывать непосредственно ВУ с оперативной памятью. Характерной особенностью КПД является то, что обмен данными между ВУ и оперативной памятью осуществляется минуя ЦП. Режим прямого доступа целесообразно использовать в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокоскоростную передачу больших массивов данных. Мини-ЭВМ может иметь несколько КПД, которые, как и у больших ЭВМ, разделяются на селекторные и мультиплексорные.

Система ввода-вывода микро-ЭВМ. Функционально система ввода-вывода микро-ЭВМ осуществляется также, как и аналогичная система мини-ЭВМ, т. е. включает в себя канал прямого доступа в оперативную память и программный канал. Так же как и в мини-ЭВМ, программный канал может работать в двух режимах: режиме программно-управляемого ввода-вывода и режима ввода-вывода по прерываниям. Архитектурные же решения системы ввод-вывод микро-ЭВМ отличаются большим разнообразием и определяются конкретным типом применяемой в АЭК микро-ЭВМ.

Устройства подготовки экспериментальной информации для ввода в ЭВМ. Информационные массивы, требующие обработки на базовой ЭВМ АЭК, могут поступать в виде потока информации от ЭВМ низшего уровня и в виде сигналограмм регистрирующих систем (магнитные ленты, перфоленты и т. д.). При этом следует подчеркнуть, что в настоящее время в качестве регистрирующих систем в основном применяют магнитные регистраторы с различными способами записи [прямая запись, амплитудная (АМ), частотная (ЧМ), кодоимпульсная (КДМ) модуляция]. Как правило, эта информация не может быть введена в базовую ЭВМ без предварительной подготовки, так как она не удовлетворяет требованиям совместимости. Для обеспечения информационной совместимости необходимо преобразовать в случае кодовой информации ее структуру (код, формат и т. д.), а в случае аналоговой — форму представления (из аналоговой в цифровую) и структуру.

К основным операциям, позволяющим устранить информационную несовместимость источников информации и базовой ЭВМ, можно отнести:

воспроизведение информации с осциллограмм (восстановление поля измерений, условий проведения эксперимента, временного масштаба эксперимента);

преобразование формы информации: аналоговой в цифровую;

идентификация по служебным сигналам тех или иных процессов, различных интервалов этих процессов и т. д.;

идентификация по служебным сигналам и выборка участков информационного массива, относящихся к процессам и тем или иным интервалам этих процессов, выделяемым для обработки в базовой ЭВМ;

сжатие, сглаживание, компоновка массивов по определенному признаку, масштабирование и т. д. (по необходимости);

формирование информационной структуры данных, совместимой с базовой ЭВМ.

Эти операции могут быть реализованы или с помощью набора технических средств, выполняющих эти операции в отдельности, или с помощью многофункционального устройства подготовки и ввода информации в ЭВМ, выполняющего все операции (см. рис. 5.10).

Система связей в АЭК

Рациональная организация связей между компонентами АЭК является одним из критериев его эффективной работы. Связи в АЭК можно разделить на два типа: связь между ЭВМ АЭК и связь ЭВМ с объектом эксперимента. В связи с тем, что при создании АЭК в систему объединяются ЭВМ различного типа, а также ЭВМ и широкая номенклатура разнообразного по своим выходным характеристикам, быстродействию и т. д. как стандартного, так и нестандартного оборудования, необходимо обеспечить совместимость объединяемых устройств. Для этой цели должны быть выполнены определенные условия по унификации связей между этими устройства-

ми. Выполнение этих условий можно осуществить двумя путями: предусмотреть жесткую унификацию и стандартизацию характеристик входов и выходов, объединяемых в систему оборудования, или предусмотреть специальные устройства сопряжения. По вышеупомянутой причине (нестандартность и разнообразие оборудования) наиболее реален второй путь, т. е. объединение с помощью стандартного интерфейса, под которым понимают совокупность унифицированных средств спряжения, обеспечивающих алгоритм обмена инфромацией между компонентами АЭК.

Связь между ЭВМ и объектом эксперимента. Интерфейс, обеспечивающий связь ЭВМ с экспериментальным оборудованием, выполняется в соответствии со стандартом на интерфейс, т. е. совокупностью рекомендаций и условий, выполнение которых обеспечивает сопряжение ЭВМ с другим оборудованием АЭК. Следует отметить, что в связи с разнообразием оборудования, используемого в АЭК, технически трудно и экономически нецелесообразно создавать единый стандартный интерфейс, поэтому в настоящее время разработано несколько стандартов на интерфейс, в том числе и международных, унифицирующих различные группы параметров и связей. Наиболее широкое применение в АЭК получили стандартные интерфейсы КАМАК и магистраль МЭК [5.26], введенная в СССР ГОСТ 26.003-80.

Интерфейсная система КАМАК предназначена для связи измерительных приборов и экспериментального оборудования с вычислительным устройством. Она обеспечивает информационную, электрическую и конструктивную совместимость входящих в нее компонентов.

Основу КАМАК составляет унифицированный набор конструктивно законченных функциональных моделей. В настоящее время разработано свыше тысячи различных модулей, подразделяющихся на несколько функциональных групп: входные, выходные, сопряжения, преобразования, обработки информации и т. д. К модулям некоторых функциональных групп подключаются внешние устройства. Связь между модулями и этими устройствами реализуется в соответствии со стандартами на аналоговые и цифровые сигналы или стандартом КАМАК. К магистрали системы модули присоединяются с помощью стандартных разъемов. Конструируются модули в виде вставных блоков, устанавливаемых в стандартные каркасы (крейты). Каждый крейт содержит 25 ячеек, из которых 23 занимают функциональные модули и 2 — контроллер, предназначенный для управления модулями крейта и сопряжения с ЭВМ.

Модули объединяются в систему с помощью магистрали, которая содержит три подсистемы шин: внутрикрейтовую, с параллельной передачей данных и с последовательной передачей данных. Внутрикрейтовая подсистема предназначена для обмена данными между модулями крейта. Подсистема с параллельной передачей данных обеспечивает обмен информацией между несколькими крейтами (максимально до семи, объединенными в одну стойку) и ЭВМ (рис. 5.13). Такую систему целесообразно применять в случае больших пространственно ограниченных АЭК или подсистем АЭК. Подсистема с последовательной передачей данных применяется при организации многокрейтовых систем, распределенных на большой территории (крейты разнесены на большие расстояния). Крейты соединяются последовательно и образуют замкнутую цепь с ЭВМ (рис. 5.14).

Интерфейсная система МЭК (приборный интерфейс МЭК) предназначена для объединения программируемых и непрограммируемых средств измерений и экспериментального оборудования с устройством управления, в качестве которого может служить ЭВМ (рис. 5.15). Следует отметить, что непрограммируемые средства измерения и оборудование в этом случае должны иметь специальный блок сопряжения, называемый блоком интерфейсных функций. Рассматриваемая интерфейсная система включает в себя блоки интерфейсных функций компонентов, объединяемых в систему, и магистральную шину.

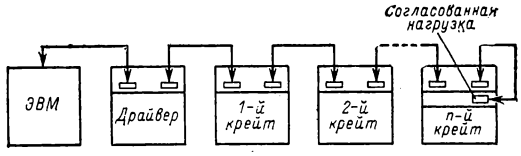


Рис. 5.13. Структурная схема системы КАМАК параллельного типа

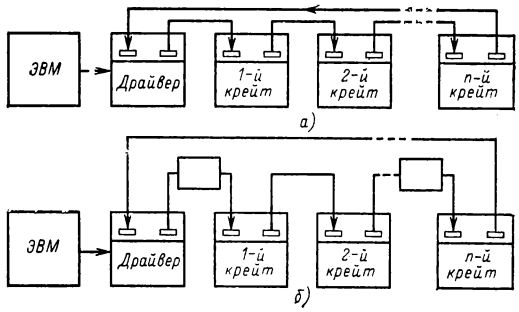


Рис. 5.14. Структурная схема системы КАМАК последовательного типа:

а — с последовательным соединением крейтов; *б* — с последовательным соединением крейтов через модемы

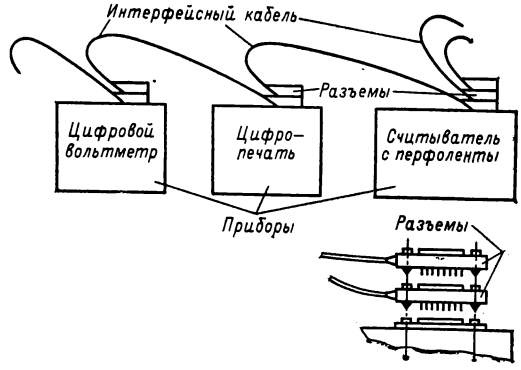


Рис. 5.15. Конструктивные элементы приборного интерфейса

С помощью приборного интерфейса МЭК можно компоновать системы любой конфигурации при соблюдении стандартных длины магистрали и максимального количества объединяемых в систему устройств.

Связь между подсистемами АЭК. Под этим видом связи будем понимать связь между ЭВМ различных уровней в иерархическом АЭК, между равноправными ЭВМ или между ЭВМ и общим ЗУ в сетевом АЭК, между ЭВМ и регистрирующими устройствами, между ЭВМ и пультом экспериментатора и т. д. Организация связи между подсистемами, которые в принципе могут находиться на значительных расстояниях друг от друга, зависит от расстояния между ними, объема передаваемой информации и требуемой скорости ее обработки.

Для связи подсистем АЭК применяют следующие типы каналов связи: прямые (физические), стандартные каналы с частотным разделением, специализированные дискретные каналы.

Прямой канал представляет собой непосредственное соединение подсистем высокочастотным кабелем (без аппаратуры усиления и восстановления сигналов). Такой вид связи используется при небольших (до нескольких сот метров) расстояниях между системами.

Наиболее широко для связи подсистем АЭК в настоящее время используют стандартные каналы с частотным разделением, т. е. существующие телеграфные и телефонные линии. В этом случае систему связи образуют линии связи, подразделяемые на три группы: низкоскоростные — телеграфные со скоростью передачи до 200 бит/с; среднескоростные — телефонные со скоростью передачи до 4800 бит/с, высокоскоростные — широкополосные стандартные 12-канальные группы со скоростью передачи до 240 000 бит/с и аппаратура передачи данных: модемы, предназначенные для модуляции и демодуляции несущей двоичными сигналами; мультиплексоры, т. е. многоканальные коммутаторы, и т. д. (на рис. 5.11).

Дискретные каналы, характеризуемые очень высокими (до десятков Мбит/с) скоростями передачи данных, высокой помехоустойчивостью и экономичностью, являются перспективными с точки зрения применения для связи между подсистемами АЭК.

Устройства сопряжения. Стандартные интерфейсные системы обеспечивают информационную и другие виды совместимости только при объединении измерительных приборов и экспериментального оборудования в подсистему. Для сопряжения подсистем АЭК между собой предусматривают специальные устройства.

Приборы и оборудование, объединенные стандартной интерфейсной системой, сопрягаются с ЭВМ с помощью контроллера.

Сопряжение равноправных ЭВМ в вычислительных сетях и ЭВМ различных уровней в иерархических АЭК осуществляется с помощью адаптеров связи ЭВМ — ЭВМ, позволяющих обращаться к ОЗУ другой машины как к своему внешнему устройству. Взаимосвязь между ЭВМ определяется набором стандартных правил, называемых протоколами. Протоколы регламентируют правила обмена информацией, управления сетью ЭВМ, управления процессами и т. д.

Программное обеспечение АЭК

Программное обеспечение (ПО) — это набор программ, обеспечивающих функционирование программируемых средств АЭК и выполнение ими их целевых функций. ПО подразделяется на общее (системное) и специальное (прикладное).

Системное ПО, носящее специальное название — операционная система (ОС), представляет собой совокупность программ, обеспечивает управление ресурсами ЭВМ (процессор, ОЗУ, ВЗУ, каналы УВВ), управление процессом выполнения программ пользователей (экспериментаторов), автоматизацию процесса программирования, контроль технического состояния и диагностику неисправностей программирования (трансляция с языков высокого уровня, редактирование, отладка), контроль технического состояния и диагностику неисправностей программируемых средств АЭК. ОС ЭВМ различных классов (больших, мини, микро) предназначены для выполнения одних и тех же функций. Они отличаются только степенью сложности и некоторыми особенностями, связанными с архитектурой ЭВМ. Являясь универсальной и инвариантной частью ПО, обслуживающей все эксперименты, реализуемые АЭК, ОС сама по себе не обеспечивает выполнение цели, т. е. реализацию того или иного эксперимента. Цель достигается при совместном использовании системного и прикладного ПО.

Прикладное ПО — это совокупность программ, ориентированных на решение конкретных задач или классов задач. Каждая программа прикладного ПО оформляется, как правило, так, что она может быть использована для решения отдельной задачи, кроме того, она сама и отдельные ее компоненты могут быть использованы как составные части другой программы. В настоящее время прикладное ПО реализуется, как правило, в виде пакетов прикладных программ (ППП), под которыми понимают комплексы программ, предназначенных для решения определенных задач или классов задач с технической документацией на них. ППП могут быть процедурно-ориентированными и проблемно-ориентированными. Процедурно-ориентированные ППП включают, например, такие программы, как телеобработка данных, управление базами данных, численный анализ, оптимизацию и т. д. Проблемно-ориентированные ППП включают программы, реализующие тот или иной вид эксперимента.

Для выполнения конкретного автоматизированного эксперимента разрабатывается алгоритм его проведения и реализующая этот алгоритм программа, состоящая из двух частей: основной (управляющей) программы и набора обслуживающих, рабочих и обрабатывающих подпрограмм. Управляющая программа должна обеспечивать диалоговый режим работы, т. е. предоставлять экспериментатору возможность вмешиваться в ее работу в ходе эксперимента, менять условия проведения эксперимента, параметры и т. д. Эта программа максимально проста и содержит в основном набор команд обращения к подпрограммам.

Программы для больших и мини-ЭВМ составляются на алгоритмическом языке высокого уровня, из которых наибольшее применение

при написании управляющих программ получили ФОРТРАН и интерактивный (обеспечивающие программирование диалога) язык БЭЙСИК. Для программирования микро-ЭВМ в основном используется язык АССЕМБЛЕР [5.18, 5.19]. Следует отметить, что для программирования микро-ЭВМ используются широко кросс-средства, с помощью которых можно, используя ПО больших или мини-ЭВМ, создавать готовые отлаженные программы для микро-ЭВМ.

При составлении программы особое внимание следует обращать на формирование баз экспериментальных данных, т. е. сеть информации, характеризующей эксперимент: характеристики сигналов, времена, состояния элементов, результаты измерений и т. д. Они должны быть сформированы так, чтобы с ними могла работать входящая в ОС система управления базами данных.

Список литературы

5.1. **Гутер Р. С., Овчинский Б. В.** Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. М.: Физматгиз, 1962. 355 с.

5.2. **Четыркин Е. М., Калихман И. Л.** Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982. 319 с.

5.3. **Гитис Э. И., Пискунов Е. А.** Аналого-цифровые преобразователи. М.: Энергоиздат, 1982. 306 с.

5.4. **Роуз Дж. Ж.** Теория электрических фильтров: Пер. с англ./Под ред. А. М. Трахтмана. М.: Советское радио, 1980. 240 с.

5.5. **Лэм Г.** Аналоговые и цифровые фильтры: Пер. с англ./Под ред. И. Н. Теплюка. М.: Мир, 1982. 592 с.

5.6. **Найденов А. И.** Трансформация спектра наносекундных импульсов. М.: Советское радио, 1979. 180 с.

5.7. **Расстригин Л. А.** Система экстремального управления. М.: Наука, 1976. 632 с.

5.8. **Математические** методы планирования эксперимента. Новосибирск: Наука, 1981. 256 с.

5.9. **Круг Г. К., Сосулин Ю. А., Фатеев В. А.** Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. М.: Наука, 1977. 208 с.

5.10. **Ивоботенко Б. Я., Ильинский Н. Ф., Копылов И. П.** Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия, 1975. 184 с.

5.11. **ГОСТ 24026-80.** Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения.

5.12. **Горелик А. П., Скрипник В. А.** Методы распознавания. М., Высшая школа, 1977. 222 с.

5.13. **Розенфельд А.** Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин: Пер. с англ./Под ред. Д. С. Лебедева. М.: Мир, 1972. 230 с.

5.14. **Илюкович А. М.** Техника электрометрии. М.: Энергия, 1976. 399 с.

5.15. **Грязнов М. И.** Интегральный метод измерения импульсов. М.: Советское радио, 1975. 280 с.

5.16 **Натурный** эксперимент: Информационное обеспечение экспериментальных исследований/ Н. И. Баклашов, А. Н. Белюнов, Г. М. Солодихин, В. А. Солодовников и др.; Под ред. Н. И. Баклашова. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.

5.17. **Ступин Ю. В.** Методы автоматизации физических экспериментов и установок на основе ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 288 с.

5.18. **Страхов А. Ф.** Автоматизированные измерительные комплексы. М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.

5.19. **Справочник** по цифровой вычислительной технике: (Электронные вычислительные машины и системы)/Б. Н. Малиновский, В. Ф. Александров, В. П. Боюн и др.; Под ред. Б. Н. Малиновского. Киев: Техніка, 1980. 320 с.

5.20. **Мячев А. А.** Системы ввода-вывода ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 168 с.

5.21. **Науман Г., Майлинг В., Щербина А.** Стандартные интерфейсы для измерительной техники. Пер. с нем. М.: Мир, 1982. 304 с.

Раздел 6

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

СОДЕРЖАНИЕ

6.1. Основные положения метрологического обеспечения народного хозяйства СССР 175

6.2. Основные положения метрологии . . . 177
Общие положения (177). Виды и методы измерений (178). Средства измерений электрических величин и их основные характеристики (178). Погрешности измерений (184). Способы описания случайных погрешностей (184). Доверительные интервалы (185). Обработка прямых измерений (186). Систематические погрешности измерений (187). Представление результатов измерений (188).

6.3. Измерение электрических величин . . . 190
Измерение напряжений и токов (190). Измерение параметров электрических цепей (191). Измерение мощности (194). Измерение мощности в цепях постоянного тока (194). Измерение активной мощности в цепях переменного тока (194). Измерение активной мощности методами двух и трех приборов (195). Измерение реактивной мощности (195). Измерение реакивной мощности методом одного прибора (195). Измерение реактивной мощности методом двух приборов (196). Измерение реактивной мощности методом трех приборов (196). Измерение расхода электрической энергии (196).

6.4. Средства измерений электрических величин 197
Измерительные мосты постоянного и переменного тока (197). Цифровые приборы для измерения напряжений и токов (197). Комбинированные цифровые приборы (199). Щитовые аналоговые приборы (200).

6.5. Основная нормативно-техническая документация в области метрологии и электрических измерений 206
Основополагающие стандарты в области метрологического обеспечения (206). Методические указания (207). Некоторые стандарты на средства измерений электрических величин (207).

6.6. Методы измерения магнитных величин. 207

6.7. Средства измерений магнитных величин. 211
Веберметры (211). Гальваномагнитные тесламетры (212). Механические тесламетры (213). Феррозондовые тесламетры (213). Тесламетры на основе ЯМР (214). Устройства для испытания МТМ (214). Устройства для испытания МММ (215).

Список литературы 218

6.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР

Разработка, производство, испытания и эксплуатация различных изделий, научные исследования и многие другие виды деятельности во всех отраслях народного хозяйства СССР требуют соответствующего метрологического обеспечения, под которым понимают установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Основные положения метрологического обеспечения изложены в ГОСТ 1.25-76.

Метрологическое обеспечение строится на трех основах: научных, технических и организационных.

Научной основой метрологического обеспечения является метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Развивается метрология по следующим основным направлениям: 1) общая теория измерений; 2) образование единиц физических величин и их систем; 3) создание эталонов и образцовых средств измерений; 4) методы передачи единиц от эталонов к образцовым и рабочим средствам измерений; 5) методы измерений и методы определения точности измерений; 6) основы обеспечения единства измерений и единообразия средств измерений (законодательная метрология).

Техническими основами метрологического обеспечения являются:

система государственных эталонов единиц физических величин;

система передачи размеров единиц физических величин от эталонов к другим средствам измерений посредством образцовых средств измерений и других средств поверки;

система разработки, организация производства и выпуска в обращение рабочих средств измерений;

система обязательных государственных испытаний средств измерений, предназначенных для серийного или массового производства, обеспечивающая единообразие средств измерений при разработке и выпуске в обращение;

система обязательной государственной и ведомственной поверки или метрологической аттестации средств измерений, обеспечивающая единообразие средств измерений при их изготовлении, эксплуатации, ремонте;

система стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов.

Организационной основой метрологического обеспечения является метрологическая служба СССР, структура которой представляет собой разветвленную сеть органов, возглавляемых Госстандартом. Метрологическая служба СССР состоит из государственной и ведомственной метрологических служб.

Государственную метрологическую службу под руководством Госстандарта несут:

главный центр государственной метрологической службы, им является Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС);

главные центры государственных эталонов, таких центров пять — это Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ), Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), Харьковский государственный научно-исследовательский институт метрологии (ХГНИИМ), Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии (СНИИМ), Казанский филиал ВНИИФТРИ;

главный центр стандартных образцов веществ и материалов — им является Свердловский филиал ВНИИМ;

центры государственных эталонов, таких центров шесть — это ВНИИМС, Свердловский и Тбилисский филиалы ВНИИМ, Харьковский, Львовский и Сибирский филиалы ВНИИФТРИ;

центр Государственной службы стандартных справочных данных;

органы государственной метрологической службы в союзных республиках, состоящие из республиканских и межобластных центров метрологии и стандартизации, межобластных, областных и межрайонных лабораторий государственного надзора за стандартами и измерительной техники, которые работают под руководством республиканских управлений Госстандарта.

Главный центр государственной метрологической службы разрабатывает научно-методические, технико-экономические, организационные и правовые основы метрологического обеспечения, а также осуществляет научно-методическое руководство:

метрологической службой страны;

разработкой программ метрологического обеспечения;

развитием эталонной базы и образцовых средств измерения;

проведением государственных испытаний;

государственным надзором и ведомственным контролем за состоянием и применением средств измерений и метрологическим обеспечением разработки, производства, испытаний и эксплуатации продукции;

стандартизацией в области обеспечения единства измерения и некоторыми другими работами.

Главные центры государственных эталонов координируют и проводят фундаментальные научные исследования в области теоретических основ метрологии, по изысканию и изучению новых физических эффектов с целью создания и развития методов и средств измерения высшей точности.

Ведомственная метрологическая служба создается министерством (ведомством) и имеет следующую структуру:

отдел метрологической службы министерства (ведомства) во главе с главным метрологом министерства (ведомства);

головная организация метрологической службы;

базовые организации метрологической службы;

отделы главных метрологов на предприятиях (в организациях).

Мероприятия по организации метрологического обеспечения зависят от вида продукции, поэтому все предприятия министерства делятся на определенные группы в зависимости от вида выпускаемой продукции или вида деятельности. Во главе каждой группы пред-

приятий находится базовая организация метрологической службы. Последняя определяется министерством (ведомством) из числа ведущих организаций или предприятий и согласовывается с Госстандартом. Базовая организация метрологической службы осуществляет научно-техническое и организационно-методическое руководство работами, направленными на метрологическое обеспечение прикрепленных к ней предприятий (организаций). Организационно-методическое и научно-техническое руководство базовыми организациями метрологической службы, а также метрологических служб предприятий по метрологическому обеспечению выпускаемой продукции осуществляется головной организацией метрологической службы, которая определяется министерством (ведомством) из числа ведущих научно-исследовательских, проектно-технологических или проектно-конструкторских организаций и согласовывается с Госстандартом.

Метрологическая служба на предприятии или в организации осуществляется отделом главного метролога либо другим подразделением или лицом и предназначена для научно-технического и организационно-методического руководства работами по метрологическому обеспечению в подразделениях (отделах, цехах, лабораториях) предприятий или организаций, а также для непосредственного выполнения работ по метрологическому обеспечению продукции, выпускаемой предприятием.

В настоящее время в народном хозяйстве нашей страны эксплуатируется около одного миллиарда измерительных приборов, а измерениями занимаются профессионально более трех миллионов трудящихся, ими ежедневно выполняется более 20 млрд. измерений. В таких условиях важно обеспечить единство измерений и единообразие средств измерений в стране. Единством измерений называют такое положение в области измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах, а погрешности известны с заданной вероятностью. Единообразие средств измерений означает их градуировку в узаконенных единицах, а также соответствие всех средств измерений требуемым метрологическим нормам.

Для решения проблемы единства измерений в нашей стране создана Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). ГСИ — это комплекс установленных стандартами взаимоувязанных правил, положений, требований и норм, определяющих организацию и методику проведения работ по оценке и обеспечению точности измерений. ГСИ является нормативно-правовой основой метрологического обеспечения научной и практической деятельности по оценке и обеспечению точности измерений. Нормативные документы ГСИ имеют законодательную силу и включают в себя около 400 стандартов, которые можно разделить на две группы — основополагающие (базовые) стандарты и стандарты, разработанные на основе базовых, т. е. конкретизирующие базовые.

Основополагающие стандарты ГСИ содержат общие организационно-методические вопросы подготовки и проведения измерений. Примером базового стандарта может служить ГОСТ 8.401-80 «ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования». Стандарты второй группы отражают конкретные методы и средств измерений различных физических величин, программы испытаний средств измерений и т. п.

Состояние единства измерений достигается проведением мероприятий:

а) созданием эталонной базы и комплекса образцовых средств измерений, обеспечивающих передачу единиц физических величин от эталонов к рабочим средствам измерений;

б) осуществлением государственного и ведомственного надзора за состоянием средств измерений;

в) проведением государственных испытаний средств измерений, их поверки, ревизии и эксперименты;

г) созданием комплекса стандартов, регламентирующих:

единицы физических величин и их воспроизведение посредством эталонов,

передачу размеров единиц физических величин рабочим средством измерений с необходимой точностью,

методы и средства измерений,

установление норм на метрологические характеристики средств измерений,

проведение стандартизации и аттестации методом выполнения измерений,

оформление и представление результатов измерений.

ГСИ содержит шесть видов стандартов: поверочных схем, государственных эталонов, норм точности измерений, методов выполнения измерений, методов и средств поверки, методов испытаний.

К числу основных объектов стандартизации ГСИ относятся:

номенклатура нормируемых метрологических характеристик средств измерений;

нормы точности измерений;

способы выражения и формы представления результатов измерений и показателей точности измерений;

методики выполнения измерений;

организация и порядок проведения государственных испытаний, поверки и метрологической аттестации средств измерений;

термины и определения в области метрологии.

В целях обеспечения единства и достоверности измерений в стране, а также поддержания парка средств измерений в постоянной готовности к применению осуществляется метрологический надзор за средствами измерений. Метрологический надзор имеет три формы осуществления: поверка средств измерений, метрологическая ревизия, метрологическая экспертиза.

Поверка средств измерений производится для установления их пригодности к применению. Поверке в обязательном порядке подлежат все средства измерений. Различают государственную и ведомственную поверки. Государственной поверке подлежат средства измерений, играющие особо важную роль в обеспечении единства измерений, например образцовые средства измерений, а также рабочие средства измерений, предназначенные для учета материальных ценностей, охраны здоровья трудящихся, безопасности и безвредности труда. Прочие средства измерений подлежат ведомственной поверке.

Поверке не подлежат только средства измерений, применяемые для наблюдения за изменением величин без оценки их значений в единицах физических величин с нормированной точностью, т. е. индикаторы. На таких приборах должно быть нанесено хорошо видимое изображение буквы И. Не подлежат поверке также средства измерений, применяемые для учебных целей, на такие средства измерений наносится отчетливо видимая буква У.

Поверку средств измерений имеют право проводить только органы метрологической службы, получившие соответствующее разрешение от одного из метрологических институтов Госстандарта.

Метрологическая ревизия проводится органами государственной метрологической службы и имеет целью определение соответствия средств измерений и применяемых методик измерений современным требованиям народного хозяйства и уровня метрологического обеспечения производства, а также готовности средств измерений к выполнению измерений с нормированной точностью. Метрологической ревизии подвергаются средства измерений предприятий, производящих изготовление, ремонт, эксплуатацию, хранение и продажу средств измерений.

Метрологическая экспертиза проводится лицами, уполномоченными органами государственной метрологической службы, и имеет цель экспертной оценки состояния средств измерений, правильность их поверки и применения. Метрологчиеская экспертиза проводится в случаях, когда возникают спорные вопросы по метрологическим свойствам, методам и средствам поверки, исправности средств измерений и пригодности их к применению.

6.2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТРОЛОГИИ

Общие положения

Измерением физической величины называют последовательность операций, выполняемых опытным путем при помощи технических средств, специально предназначенных для этой цели, по нахождению с известной точностью значения физической величины, характеризующей исследуемый объект или явление. Физическая величина определяется как свойство, общее в качественном отношении для многих физических объектов (физических систем, их состояний и происходящих в них процессов), но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них. Физическими величинами являются ток, напряжение, сопротивление электрической цепи и т. п. Говорят, например, «ток 5 ампер или напряжение 3 вольта». Выражения «величина тока 5 ампер» или «величина напряжения 3 вольта» являются неправильными, так как в данном случае ток и напряжение являются физическими величинами, следовательно, получается тавтология (величина величины).

Часто вместо термина «величина» пользуются термином «параметр сигнала», понимая под сигналом некоторый физический процесс.

Поскольку физическая величина применяется для количественной оценки интенсивности проявления определенного свойства, то она должна обладать размером. Размер физической величины — это количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина».

Для определения размера физической величины вводится понятие «единица физической величины» — это физическая величина, размеру которой по определению присвоено числовое значение 1. Единицы физических величин воспроизводятся посредством эталонов и мер.

Физические величины подразделяются на основные и производные.

Под основной понимается величина, которая определяется независимо от других величин.

Производными называются величины, определяемые через основные, т. е. связанные с основными определенными соотношениями.

Оценка конкретной физической величины в виде произведения отвлеченного числа на принятую для нее единицу называется значением физической величины.

В измерительной технике важную роль играет понятие истинного значения физической величины, под которым понимается значение физической величины, которое стремятся найти в соответствии с поставленной задачей и которое абсолютно верно отражало бы эту величину. Определить экспериментальным путем истинное значение физической величины невозможно. Дело в том, что как бы тщательно ни организовывался эксперимент, условия, в которых он производится, принципиально не могут быть абсолютно неизменными и они будут влиять на результат определения числового значения физической величины. Кроме того, всегда остается некоторая неопределенность, присущая самой физической величине в каждом конкретном случае. Таким образом, истинное значение физической величины является идеализацией и часто не только не известно экспериментатору, но и физически не существует. Тем не менее этим понятием широко пользуются в теории измерений.

На практике вместо истинного значения физической величины часто пользуются понятием действительного значения физической величины, под которым понимается значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для поставленной измерительной задачи может его заменить. Практически действительное значение физической величины определяется посредством образцовых мер и приборов, погрешностями которых в результате измерения можно пренебречь.

В зависимости от поведения во времени физическая величина может быть статической или динамической.

Значение физической величины, найденное путем ее измерения, называют результатом измерения. Важной характеристикой любого результата измерения является его точность, которая отражает близость результата измерения к истинному значению измеряемой величины. На практике понятием «точность» обычно пользуются только для качественной характеристики измерений — низкая точность, высокая точность и т. п. Общепринятого количественного способа выражения точности в на-

стоящее время не существует, для этой цели пользуются понятием погрешности измерения.

Погрешность измерения — это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины (см. ниже).

Виды и методы измерений

На практике интересующая нас величина не всегда поддается непосредственному измерению. Числовые значения таких величин определяются путем обработки результатов измерения других величин, поддающихся непосредственному измерению.

В зависимости от вида функциональной связи между искомой и непосредственно измеряемыми величинами и от способа получения числового значения измеряемой величины все измерения классифицируются на четыре вида: прямые, косвенные, совокупные и совместные.

Прямым называют измерение, при котором входной измерительный сигнал содержит информацию о физической величине, подлежащей измерению в соответствии с поставленной задачей. Примером прямых измерений может служить измерение напряжения вольтметром. При этом не учитывается простота или сложность измерительного эксперимента. Прямое измерение может содержать ряд наблюдений, а результат измерения вычисляется по определенным формулам. Прямые измерения лежат в основе других видов измерений.

Косвенным называют измерение, при котором искомое значение вычисляют на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Примером косвенного измерения может служить определение удельного сопротивления материала путем прямых измерений длины, площади поперечного сечения и электрического сопротивления образца из данного материала.

Совокупные измерения — измерения нескольких одноименных физических величин путем выполнения прямых измерений различных сочетаний этих величин.

Совместные измерения — измерения, состоящие из прямых измерений нескольких физических величин в изменяющихся условиях и последующего нахождения зависимости между этими величинами. Примером совместных измерений может служить экспериментальное определение электрического сопротивления и температурного коэффициента сопротивления при различных температурах.

По зависимости от режима изменения величины различают статическое и динамическое измерения.

Под статическим измерением понимают измерения постоянной или пренебрежимо мало изменяющейся физической величины либо параметра стационарного процесса, при котором искомое значение находят по установившемуся выходному измерительному сигналу.

Под динамическим измерением понимают измерение переменной во времени, импульсной или постоянной физической величины, при котором одно или ряд искомых значений находят по изменяющемуся во времени выходному измерительному сигналу.

Организация измерительного эксперимента может основываться на различных приемах сравнения измеряемой величины с мерой. При этом учитываются требуемые точность, удобство и быстрота измерения. Метод решения измерительной задачи, характеризуемый используемыми физическими явлениями и средствами измерений, а также приемами их использования, называется методом измерений.

Различают следующие два метода измерений: прямым преобразованием и сравнением с мерой. Метод сравнения с мерой в свою очередь подразделяется на методы: дифференциальный, нулевой, замещения, перестановки, дополнения, совпадений.

Дифференциальный метод — это метод сравнения, при котором образуют и оценивают измерительный сигнал, являющийся разностью измерительных сигналов, поступающих от исследуемого объекта и меры. Этот метод позволяет получить результат измерения с высокой точностью даже в случае применения сравнительно неточных измерительных приборов при условии, что точность применяемых мер достаточно высока. Например, если разность между значением измеряемой величины и меры составляет 1 % и измеряется прибором, имеющим погрешность 1 %, то погрешность измерения этой величины будет 0,01 %. Дифференциальный метод широко используется в измерительной технике — на нем основана работа неуравновешенных мостов постоянного тока и др.

Нулевой метод — метод сравнения, при котором уравнивают измерительные сигналы, поступающие от исследуемого объекта и меры. Нулевой метод является предельным случаем дифференциального метода и сохраняет преимущества последнего; применяется в уравновешенных мостах, компенсаторах, цифровых приборах и т. д.

Метод замещения — метод сравнения, при котором измерительный сигнал, поступающий от исследуемого объекта, замещают сигналом, поступающим от меры. Метод замещения позволяет исключить многие источники погрешностей измерительных приборов, обусловленных смещением нулевых уровней и нестабильностью коэффициентов преобразования функциональных узлов. Метод замещения применяется в цифровых вольтметрах, аналого-цифровых преобразователях и т. д.

Метод перестановки — метод сравнения, при котором измерительные сигналы, поступающие от исследуемого объекта и меры, сравнивают до и после их взаимной перестановки.

Метод дополнения — метод сравнения, при котором измерительный сигнал, поступающий от исследуемого объекта, дополняют измерительным сигналом, поступающим от меры, и получают заданный суммарный измерительный сигнал.

Метод совпадений — метод сравнения, при котором образуют разность измерительных сигналов, поступающих от исследуемого объекта и меры, и оценивают ее по совпадениям или биениям.

Средства измерений электрических величин и их основные характеристики

Средство измерений — это техническое средство, используемое при измерениях и

имеющее нормированные метрологические характеристики.

По характеру участия в измерительном процессе все средства можно разделить на следующие группы: меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные каналы, измерительные установки, измерительные системы, измерительная аппаратура.

Мера — средство измерений, предназначенное для воспроизведения одной или нескольких конкретных физических величин, заданных по значению.

Измерительный прибор — средство измерений, предназначенное для преобразования измерительного сигнала в форму, позволяющую наблюдателю воспринять значение измеряемой физической величины.

Измерительный преобразователь — средство измерений, предназначенное для преобразования измерительного сигнала в промежуточную форму.

Меры, измерительные приборы или измерительные преобразователи, признанные метрологической службой пригодными для поверки по ним других средств измерений, называются образцовыми средствами измерения. Особенность образцовых средств измерения заключается в том, что они предназначены только для поверки по ним других средств измерений. Поэтому они должны храниться в отдельных помещениях и применение их для выполнения технических измерений не допускается.

Измерительный канал — функционально объединенная совокупность средств измерений и других технических средств, предназначенная для последовательного преобразования одного измерительного сигнала.

Измерительная установка — функционально объединенная совокупность средств измерений и нескольких физических величин и вспомогательных устройств, предназначенная для получения измерительной информации об исследуемом объекте в условиях, изменяемых в соответствии с поставленной измерительной задачей. Если измерительная установка содержит средства автоматизации операций, которые полностью исключают участие наблюдателя, то ее называют автоматической, не полностью — полуавтоматической.

Измерительная система — функционально объединенная совокупность средств измерений нескольких физических величин и вспомогательных устройств, предназначенная для получения измерительной информации об исследуемом объекте в условиях его функционирования или хранения. Измерительная система, в состав которой входят средства автоматизации операций и контроля ее исправности, называется автоматизированной.

Измерительная аппаратура — совокупность отдельных средств измерений, вспомогательных устройств и (или) их функционально объединенных совокупностей.

Точность является основным качеством средства измерения, отражающим близость к нулю его погрешностей. Точность средства измерений характеризуют нормируемыми метрологическими характеристиками в соответствии с ГОСТ 8009-72.

Рис. 6.1. Систематизация погрешностей средств измерения

Погрешности средств измерения классифицируются по следующим признакам: способу выражения, характеру проявления, зависимости от значения измеряемой величины, режиму изменения измеряемой величины, причине, условиям и месту возникновения (рис. 6.1).

По способу выражения погрешности делятся на абсолютные, приведенные и относительные.

Абсолютная погрешность меры Δx — это разность между номинальным значением меры $x_{ном}$ и истинным значением воспроизводимой ею величины x:

$$\Delta x = x_{ном} - x.$$

Абсолютная погрешность измерительного прибора Δ — это разность между показанием прибора A и истинным значением измеряемой величины $A_и$:

$$\Delta = A - A_и.$$

Приведенная погрешность измерительного прибора γ определяется как отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению $A_н$ и выражается обычно в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_н} 100.$$

Нормирующее значение — условно принятое значение, которое принимается равным:

а) для средств измерений с равномерной или степенной шкалой, а также для измерительных преобразователей, если нулевое значение входного (выходного) сигнала находится на краю или вне диапазона измерений, — большему из пределов измерений или равным большему из модулей пределов измерений, если нулевое значение находится внутри диапазона измерений;

для электроизмерительных приборов с равномерной или степенной шкалой и нулевой отметкой внутри диапазона измерений — сумме модулей пределов измерений;

б) для средств измерений, шкала которых имеет условный нуль, — модулю разности пре-

делов измерений, например для милливольтметра термоэлектрического термометра с пределами измерений 100—300 °С нормирующее значение $A_н = 200$ °С.

в) для средств измерений с установленным номинальным значением — этому номинальному значению, например частотомер с диапазоном измерений 45—55 Гц и номинальной частотой 50 Гц имеет $A_н = 50$ Гц;

г) для средств измерений с существенно нелинейной шкалой (например, логарифмической или гиперболической) — всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений.

Относительная погрешность меры (измерительного прибора) выражается отношением абсолютной погрешности меры (измерительного прибора) к истинному значению воспроизводимой (измеряемой) ею (им) величины:

$$\delta = \Delta/A.$$

Относительная погрешность может быть выражена в процентах.

По характеру проявления погрешности делятся на систематические и случайные. Систематическая погрешность средства измерений— это составляющая погрешности средства измерений, остающаяся постоянной или изменяющаяся как детерминированная функция некоторых аргументов. Случайная погрешность средства измерений — это составляющая погрешности средства измерений, изменяющаяся как центрированная случайная величина.

По зависимости от значения измеряемой величины погрешности средств измерения делятся на аддитивные и мультипликативные. Аддитивные погрешности не зависят от значения измеряемой величины, мультипликативные — пропорциональны последней. Источником аддитивной погрешности могут служить напряжение смещения в усилителях постоянного тока, шумы элементов схемы, внешние наводки и утечки в схеме, термо-ЭДС и пр. Источником мультипликативной погрешности — нестабильность или несоответствие номинальным значениям коэффициентов передач отдельных функциональных узлов средств измерения: делителей напряжения, усилителей и т. п.

По режиму изменения измеряемой величины погрешности средств измерений разделяют на статические и динамические. Статическая погрешность возникает при измерении постоянных величин. Динамические погрешности появляются при измерении переменных во времени величин. Причина динамических погрешностей заключается в инерционности средств измерения.

По причине и условиям возникновения погрешностей средств измерения различают основные и дополнительные погрешности.

Основная погрешность — погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях, при которых влияющие величины имеют нормальные значения (или находятся в пределах нормальной области значений), устанавливаемые в стандартах на средства измерения данного вида.

Термин «дополнительная погрешность» применяется только к мерам. Дополнительная погрешность — составляющая погрешности средства измерений, вызываемая отклонением одной или более влияющих величин от нормального значения или выходом за пределы нормальной области значений. Применительно к измерительным приборам пользуются термином «изменение показаний измерительного прибора под действием влияющей величины», под которым понимают изменение погрешности измерительного прибора, вызванное отклонением одной из влияющих величин от нормального значения или выходом их за пределы нормальной области значений. Область значений влияющей величины, устанавливаемая в стандартах или технических условиях на средства измерений, в пределах которой значение дополнительной погрешности (изменение показаний) не должно превышать установленных пределов, называют расширенной областью.

В зависимости от места возникновения погрешности средств измерений делятся на методические и инструментальные.

Методические погрешности обусловлены несовершенством метода преобразования измерительной информации в средстве измерений. Например, если функция преобразования средства измерений является принципиально нелинейной, но эта нелинейность выражена слабо, то ею часто пренебрегают и считают функцию преобразования линейной, однако вследствие такой замены появляется методическая погрешность.

Инструментальные погрешности вызываются несовершенством изготовления элементов и узлов средства измерений.

Предел допускаемой погрешности средства измерений — метрологическая характеристика средства измерений, представляющая собой предел, который не должна превышать погрешность средства измерений. Это понятие применимо к основной и дополнительной погрешностям, а также изменению показаний.

Обобщенной характеристикой средства измерений, отражающей уровень их точности и представленной набором нормированных метрологических характеристик, является класс точности, который характеризует средство измерений, но не является непосредственной характеристикой точности измерения, выполняемого с помощью данного средства.

Классы точности устанавливаются на средства измерений, предназначенные для работы в условиях, при которых динамические погрешности измерения пренебрежимо малы по сравнению с нормированной для этих средств измерений погрешностью.

Пределы допускаемых основной и дополнительных погрешностей средств измерений для каждого из классов точности устанавливаются в виде абсолютных, приведенных или относительных погрешностей или в виде определенного числа делений. В стандартах на средства измерений для каждого класса точности устанавливают конкретные требования к метрологическим характеристикам, в совокупности отражающие уровень точности средств измерений этого класса. Например, для вольтметров, отвечающих требованиям ГОСТ 8711-78, нормируют следующие метрологические характеристики:

предел допускаемой основной погрешности и соответствующие нормальные условия,

пределы допускаемых дополнительных погрешностей и соответствующие рабочие области влияющих величин,

пределы допускаемой вариации показаний, невозвращение указателя к нулевой отметке.

Средства измерений с двумя и большим числом диапазонов измерений одной и той же физической величины могут иметь два и более классов точности. Например, вольтметр с диапазонами измерений 0—1 и 0—3 В может иметь разные классы точности на указанных диапазонах. Если средство измерений предназначено для измерения нескольких физических величин (например, тока, напряжения, сопротивления), то для каждой измеряемой величины допускается присваивать различные классы точности.

Классы точности цифровых измерительных приборов со встроенными вычислительными устройствами для дополнительной обработки измерительной информации устанавливаются без учета режима обработки.

ГОСТ 8.401-80 предусматривает следующие способы выражения пределов допускаемой погрешности:

1. Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности должны выражаться:

а) одним значением

$$\Delta = \pm a,$$

где Δ — предел допускаемой абсолютной основной погрешности; a — положительное число;

б) двучленной формулой

$$\Delta = \pm (a + bx),$$

где a и b положительные числа; x — номинальное значение, показание или сигнал (значение x принимается без учета знака). Двучленная формула применяется в тех случаях, при которых предел допускаемой погрешности зависит от номинального значения, показания или сигнала;

в) в виде таблицы или графика пределов допускаемых погрешностей для разных номинальных значений, показаний или сигналов.

2. Пределы допускаемой приведенной основной погрешности определяются формулой

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{X_н} 100,$$

где γ — предел допускаемой приведенной основной погрешности в процентах нормирующего значения; $X_н$ — нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ.

3. Пределы допускаемой относительной основной погрешности выражаются одной из формул

$$\delta = + \frac{\Delta}{x} 100 = \pm c$$

или

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{x} 100 = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_к}{x} \right| - 1 \right) \right],$$

где δ — предел допускаемой относительной основной погрешности в процентах значения измеряемой величины; $X_к$ — больший (по модулю) из пределов измерений; c, d — положительные числа.

В последней формуле первое слагаемое в правой части (коэффициент c) отражает относительную погрешность средства измерения при $x = X_к$, второе слагаемое характеризует возрастание относительной погрешности при уменьшении показаний средства измерения.

Нормирование пределов допускаемых дополнительных погрешностей, вызываемых действием отдельных влияющих величин, производится одним из следующих двух способов:

а) указанием конкретных значений пределов допускаемых дополнительных погрешностей для расширенной области значений влияющей величины;

б) указанием функциональной зависимости допускаемой дополнительной погрешности от изменения влияющей величины.

Основная и дополнительная погрешности, как правило, выражаются одним и тем же способом. Пределы допускаемых погрешностей выражаются не более чем двумя значащими цифрами, причем погрешность округления при вычислении пределов не должна превышать 5 %.

Условные обозначения классов точности зависят от средств измерений.

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых выражаются в форме абсолютных или относительных погрешностей, причем последние представлены в виде графика, таблицы или формулы, класс точности обозначается прописными буквами латинского алфавита или римскими цифрами. Классы точности, которым соответствуют меньшие пределы допускаемых погрешностей, обозначаются буквами, расположенными ближе к началу алфавита, или цифрами, отражающими меньшие числа.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в процентах значения измеряемой величины (δ), обозначаются помещенными в кружок числами, совпадающими со значением предела допускаемой основной погрешности. Например, 0,5 в кружке для $\delta = \pm 0{,}5$ %. К таким средствам измерения относятся однозначные меры (которые используются не в наборе), интегрирующие приборы (например, счетчики электрической энергии) и пр.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в процентах нормирующего значения (γ), определенного в единицах измеряемой величины, обозначаются числами, совпадающими со значением предела допускаемой основной приведенной погрешности. Например, 1,5 для $\gamma = \pm 1{,}5$ %. К таким средствам измерения относятся главным образом показывающие и самопишущие приборы.

Согласно ГОСТ 8.401-80 средствам измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в виде приведенных погрешностей, присваиваются классы точности, выбираемые из ряда чисел: 1; 1,5; 2; 2,5; (3); 4; 5 и 6×10^n, где $n = +1$; 0; —1; —2 и т. д., число 3, стоящее в скобках, допущено к применению, но не рекомендуется и во вновь разрабатываемых средствах измерений не применяется.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых вы-

Таблица 6.1. **Правила построения и примеры обозначения классов точности**

Форма выражения погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности, %	Обозначение класса точности	
			в документации	на средстве измерения
Приведенная	По формуле $\gamma = \pm\Delta/X_н = \pm p$:			
	если нормирующее значение выражено в единицах величины на входе (выходе) средств измерений	$\gamma = \pm 1{,}5$	Класс точности 1,5	1,5
	если нормирующее значение принято равным длине шкалы или ее части	$\gamma = \pm 1{,}0$	Класс точности 1,0	1,0
Относительная	По формуле $\delta = \pm\Delta/м = \pm c$	$\delta = \pm 0{,}5$	Класс точности 0,5	0,5 в кружке
	По формуле $\delta = \pm\left[c + d\left(\left\|\frac{X_к}{x}\right\| - 1\right)\right]$	$\delta = \pm\left[0{,}02 + 0{,}01\left(\left\|\frac{X_к}{x}\right\| - 1\right)\right]$	Класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01
Абсолютная	По формулам: $\Delta = \pm a$; $\Delta = \pm(a + bx)$	—	Класс точности М	М
Относительная	По формулам: $\delta = \pm c$; $\delta = \pm\left[c + d\left(\left\|\frac{X_к}{x}\right\| - 1\right)\right]$, по другим формулам в виде графика или таблицы		Класс точности С	С

ражаются двучленной формулой $\delta = \pm\left[c + d \times \left(\left|\frac{X_к}{x}\right| - 1\right)\right]$, обозначаются двумя числами, выражающими c и d в процентах и разделенными косой чертой (c/d). Например, для $\delta = \pm\left[0{,}2 + 0{,}01\left(\left|\frac{X_к}{x}\right| - 1\right)\right]$, класс точности обозначается 0,02/0,01. К таким приборам относятся цифровые вольтметры, цифровые мосты и т. п.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в процентах нормирующего значения, определенного длиной шкалы, обозначаются числом в процентах, помещенным между двумя линиями, расположенными под углом. Например, 0,5. К таким средствам измерения относятся показывающие приборы с гиперболической или логарифмической шкалой.

Правила построения и примеры обозначения классов точности в документации и на средствах измерений представлены в табл. 6.1.

Нормальное значение и область нормальных значений влияющей величины, если она нанесена на средство измерения, подчеркивается. Расширенная область значений влияющей величины указывается без подчеркивания.

Нормальные условия эксплуатации средств измерения представлены в табл. 6.2.

В соответствии с ГОСТ 22261-76 для средств измерений устанавливаются следующие условия применения: нормальные, рабочие и предельные. Последние — для целей транспортирования и хранения.

При нормальных условиях применения

Таблица 6.2. **Нормальные условия эксплуатации средств измерений**

Влияющая величина	Допустимое значение отклонения параметра	
	для приборов классов 0,05—0,5	для приборов классов 1,0—4,0
Рабочее положение	Указанное на шкале с допуском	
	±1°; ±0,2°	±2°
	Указанная на шкале с допуском	
	±2° С	±5° С
Температура	Если указания отсутствуют, то	
	от 18 до 22° С	от 15 до 25° С
Напряжение	Указанное на шкале с допуском	
	±2 %	±2 %
Частота	Указанная на шкале с допуском	
	±2 %	±2 %
	Если указания отсутствуют, то	
	49—51 Гц	49—51 Гц

значения (области значений) влияющих величин, характеризующих климатические воздействия и электропитание средств измерений, должны находиться в пределах:

Окружающая температура, °С	20±0,5; 20±1; 20±2; 20±5
Относительная влажность воздуха, %	65±15
Атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.)	100±4(750±30)
Напряжение питающей сети, В	220±4,4 для сети с частотой 50 Гц; 220±4,4 или 115±2,5 для сети с частотой 400 Гц

Под рабочими условиями применения понимаются допустимые значения климатических и механических воздействий, а также параметров источников питания, при которых приборы сохраняют свою работоспособность и нормированную для них точность в течение длительного времени.

Предельными условиями применения называют граничные значения климатических и механических воздействий, при которых приборы могут храниться или транспортироваться, сохраняя свою работоспособность и нормированную для них точность.

В зависимости от вида внешних воздействий и их значений все средства измерений делятся на семь групп. В табл. 6.3 представлены значения климатических влияющих величин для рабочих и предельных условий применения указанных групп, соответствующие ГОСТ 22261-76.

Применительно к источникам питания средств измерений рабочие условия применения зависят от вида источника питания: в случае сети переменного тока частотой 50 Гц — напряжение 220±22 В; для сети переменного тока частотой 400 Гц — напряжение 115±5,75 В и (или) 220±11 В, отклонение частоты ±12 Гц; для встраиваемых или внешних источников постоянного тока напряжение и максимальный потребляемый ток устанавливаются в стандартах или технических условиях на конкретное средство измерений и указываются в эксплуатационной документации.

Средства измерений должны отвечать требованиям тепло-, холодо- и влагоустойчивости, т. е. их характеристики не должны отклоняться от норм, установленных стандартами, во время пребывания в рабочих климатических условиях применения по табл. 6.3.

Средства измерений должны отвечать требованиям тепло-, холодо- и влагопрочности после пребывания в предельных климатических условиях с последующим возвращением в нормальные или рабочие условия и выдержки, длительность которой установлена в стандартах на данное средство измерения, т. е. должны сохранять свою работоспособность и нормированную для них точность.

Щитовые электроизмерительные приборы и преобразователи могут содержать в технических условиях требования вибро- и ударопрочности, вибро- и ударостойкости. Переносные приборы 5-й и 7-й групп являются вибро- и ударопрочными. Для средств измерений 4—7-й групп в технических условиях допускается устанавливать требования ветроустойчивости, пыле- и брызгозащищенности. Все средства измерений, для которых установлены указанные требования, должны сохранять свои характеристики в пределах допусков, предусмотренных стандартами при соответствующих внешних воздействиях.

Основным показателем надежности средств измерений в соответствии с ГОСТ 22261-76 является наработка на отказ, значение которой устанавливается из ряда 500; 600; 700; 800; 900; 1000 и далее через 250 ч.

Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений производится в соответствии с требованиями ГОСТ 8.256-77. Различают полные и ча-

Таблица 6.3. **Значения климатических влияющих величин**

Условия применения	Влияющая величина		Значения влияющей величины для групп средств измерений						
			1	2	3	4	5	6	7
Рабочие	Температура окружающего воздуха, °С	Нижнее значение	10	10	5	—10	—30	—50	—30
		Верхнее значение	25	35	40	40	50	60	70
	Относительная влажность воздуха, %	Среднемесячное значение	65 при 20° С		80 при 20° С			90 при 27° С	80 при 20° С
		Верхнее значение	80 при 20° С	80 при 25° С	90 при 25° С	90 при 30° С	90 при 30° С	95 при 35° С	90 при 30° С
	Атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.)		86—106 (650—800)				60—106 (460—800)		
Предельные	Температура окружающего воздуха, °С	Нижнее значение	—50						
		Верхнее значение	+50						
	Относительная влажность воздуха, %		95 при 25° С		95 при 30° С			95 при 35° С	
	Атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.)		86—106 (750—800)				60—106 (460—800)		

стные динамические характеристики. Под полной динамической характеристикой средства измерений понимают динамическую характеристику, однозначно определяющую изменение выходного сигнала средства измерений при произвольном изменении во времени входного сигнала. Полными динамическими характеристиками являются: дифференциальное уравнение, импульсная или переходная характеристики, передаточная функция, совокупность амплитудно- и фазо-частотной характеристик. Частная динамическая характеристика средства измерений представляет собой параметр или функционал полной динамической характеристики. Например, для электронно-лучевого осциллографа частными динамическими характеристиками являются параметры переходной характеристики: время нарастания, выброс, неравномерность вершины (ГОСТ 22737-77).

Нормируются динамические характеристики средств измерений путем задания одной полной либо необходимым набором частных динамических характеристик. Например, для аналоговых регистрирующих приборов нормируется одна из полных динамических характеристик; для показывающих приборов — время установления показаний и т. д. Вид нормируемых динамических характеристик устанавливается в стандартах и технических условиях на средства измерений конкретного типа.

Если динамические характеристики представлены совокупностью параметров, то для каждого параметра указываются его номинальное значение и пределы допускаемых отклонений; если используется аналитическая форма, то указывается вид функции и параметры, причем для последних указываются номинальные значения и пределы допускаемых отклонений от номинальных значений.

Погрешности измерений

Погрешности измерений систематизируются по двум основным признакам: месту возникновения и характеру проявления (рис. 6.2).

Методическими погрешностями называют составляющие погрешности измерения, возникающие из-за несовершенства методов измерения и обработки результата измерения.

Инструментальными погрешностями измерений называют погрешности, обусловленные несовершенством (ограниченной точностью) применяемых средств измерения.

Личные погрешности обусловлены индивидуальными особенностями лица (экспериментатора), выполняющего измерение. Личные погрешности проявляются, например, в неправильном отсчитывании десятых долей деления шкалы прибора, неправильной фиксации момента исчезновения изображения нити накаливания на экране оптического пирометра и т. п.

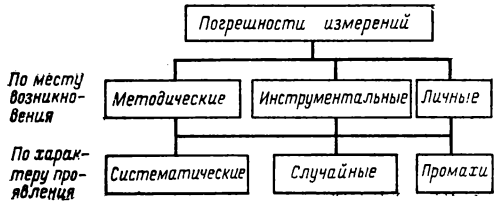


Рис. 6.2. Систематизация погрешностей измерения

Систематическая погрешность — составляющая погрешности результата измерения конкретной физической величины, остающаяся постоянной или изменяющаяся как детерминированная функция некоторых аргументов. Качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей результатов измерений, называют правильностью измерений.

Случайная погрешность — составляющая погрешности результата измерения конкретной физической величины, изменяющаяся как центрированная случайная величина. Качество измерений, отражающее близость результатов измерений, выполненных в одних и тех же условиях, называют сходимостью измерений. Хорошая сходимость свидетельствует о малости случайных погрешностей.

Промахи — следствие неправильных действий экспериментатора. Это, например, неправильное снятие показаний прибора, описка при записи результата наблюдения и т. п. Промахи всегда исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Погрешности измерений определяют зону неопределенности результата измерений. Если погрешность отвечает некоторой вероятности, то ее называют доверительной погрешностью, а границы, в которых находится погрешность, — доверительными границами погрешности результата измерения. Если границы погрешности назначены так, что погрешность измерения не выходит за эти границы, то зона внутри указанных границ называется предельной погрешностью измерения.

Погрешности измерений не требуется знать очень точно. В окончательной записи погрешность измерения принято выражать числом с одной или двумя значащими цифрами, причем две цифры оставляют при точных измерениях, а также в тех случаях, когда цифра старшего разряда числа, выражающего погрешность измерения, равна трем или меньше трех. Если погрешность выражают числом с одной значащей цифрой, то цифру 9 не применяют; если погрешность выражается двумя значащими цифрами, то для младшего разряда обычно применяют только цифру 5. При промежуточных расчетах используют три-четыре значащие цифры погрешности в зависимости от выполняемой математической операции, чтобы в последующем погрешность округления не слишком искажала результат.

Способы описания случайных погрешностей

Случайные погрешности описываются методами теории вероятностей, при этом случайная погрешность рассматривается как случайная величина.

Случайная величина полностью описывается функцией распределения вероятностей случайной величины $F(x)$, которая выражает вероятность того, что случайная величина X будет меньше x:

$$F(x) = P(X < x),$$

где $F(x)$ — неубывающая функция, причем $F(-\infty)=0$, $F(+\infty)=1$.

Наряду с функцией распределения вероятностей случайной величины применяется плотность распределения вероятностей случайной величины $f(x)$:

$$f(x)=dF(x)/dx.$$

В измерительной практике встречаются с различными распределениями погрешностей. Однако чаще всего имеют дело с нормальным распределением.

В случае нормального распределения

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-(x-M)^2/2\sigma^2}$$

где $1M$ — математическое ожидание случайной величины (истинное значение измеряемой величины); σ — среднеквадратическое отклонение.

Вероятность P попадания на интервал $[\Delta_1;\ \Delta_2]$ при $1M=0$ для нормального распределения равна:

$$P=\int_{-\Delta_1}^{\Delta_2}f(x)\,dx=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\Delta_1}^{\Delta_2}e^{-x^2/2\sigma^2}\,dx.$$

Последний интеграл через элементарные функции не выражается, поэтому подсчет вероятности P производится с помощью интеграла вероятности (функции Лапласа):

$$\Phi(z)=\frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int_0^z e^{-t^2/2}\,dt,$$

для которого составлена таблица [6.5, 6.6].

При этом

$$P=\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{\Delta_2}{\sigma}\right)+\Phi\left(\frac{\Delta_1}{\sigma}\right)\right]=$$

$$=\frac{1}{2}[\Phi(z_2)+\Phi(z_1)],$$

где $z_1=\Delta_1/\sigma$; $\quad z_2=\Delta_2/\sigma$.

Для симметричного интервала ($\Delta_1=\Delta_2=\Delta$) последнее выражение упрощается:

$$P=\Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right)=\Phi(z).$$

Если $m\neq 0$, то

$$P=\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{\Delta_2-M}{\sigma}\right)+\Phi\left(\frac{\Delta_1+M}{\sigma}\right)\right].$$

Нормальное распределение полностью характеризуется двумя параметрами — математическим ожиданием M и дисперсией D или среднеквадратическим отклонением $\sigma=\sqrt{D}$. Определить точные значения M и D по ограниченному числу наблюдений невозможно. Однако им можно дать приближенные оценки $\widetilde{M}$ и $\widetilde{D}$. К указанным оценкам предъявляются требования состоятельности, несмещенности и эффективности. Оценка $\widetilde{a}$ параметра a называется состоятельной, если при увеличении числа наблюдений N она приближается к параметру a. Оценка $\widetilde{a}$ называется несмещенной, если замена параметра a его оценкой $\widetilde{a}$ не приводит к систематическим ошибкам в сторону завышения или занижения, т. е. если выполняется условие $M[\widetilde{a}]=a$. Оценка $\widetilde{a}$ называется эффективной, если она обладает наименьшей дисперсией по сравнению с другими.

В случае нормального распределения всем указанным требованиям удовлетворяют оценки

$$\widetilde{M}=\frac{\sum_{i=1}^{N}x_i}{N};$$

$$\widetilde{\sigma}=\sqrt{\widetilde{D}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\widetilde{M})^2}{N-1}},$$

или

$$\sigma=\sqrt{\widetilde{D}}=\sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}x_i^2}{N}-\widetilde{M}^2\right)\frac{N}{N-1}}.$$

Поскольку выполнение указанных требований к оценкам зависит от вида распределения погрешностей, то возникает задача проверки нормальности распределения случайных погрешностей. Эта задача решается с помощью критериев согласия. Известен ряд критериев согласия: К. Пирсона (критерий χ^2), А. Н. Колмогорова и др. [6.5]. Однако на практике при большом числе наблюдений ($N>50$) предпочтение отдается критерию К. Пирсона. Сущность этого метода заключается в сравнении гистограммы экспериментальных данных с аналогичной гистограммой, построенной на основе нормального распределения.

Доверительные интервалы

Для оценки степени достоверности результата измерения пользуются понятиями доверительного интервала и доверительной вероятности.

Доверительным интервалом называется интервал $I_д$, который с заданной вероятностью $P_д$, называемой доверительной, накрывает истинное значение измеряемой величины $a_и$:

$$I_д=(\widetilde{a}-\Delta_1;\ \widetilde{a}+\Delta_2);$$

$$P_д=P(-\Delta_1\leqslant\widetilde{a}-a\leqslant\Delta_2),$$

где $\widetilde{a}$ — оценка величины a, полученная в результате измерения; Δ_1, Δ_2 — положительные числа, определяющие длину интервала $I_д$.

При отсутствии систематических погрешностей и известной плотности распределения вероятностей случайных погрешностей вычисление доверительной вероятности не вызывает принципиальных трудностей

$$P_д=P(-\Delta_1\leqslant X\leqslant\Delta_2)=\int_{-\Delta_1}^{\Delta_2}f(x)\,dx.$$

Для симметричного интервала $\Delta_1=\Delta_2=\Delta$

$$P_д = P(|X| < \Delta) = \int_{-\Delta}^{\Delta} f(x)\,dx.$$

В случае нормального распределения

$$P_д = \Phi(\Delta/\sigma).$$

Таким образом, если известно, что случайная погрешность подчиняется нормальному распределению, то, пользуясь таблицей интеграла вероятностей (функции Лапласа), можно при любом заданном доверительном интервале определить значение соответствующей доверительной вероятности, а также решить обратную задачу.

Если закон распределения случайных погрешностей неизвестен, то можно дать лишь грубую оценку точности результата измерения на основе неравенства Чебышева:

$$P_д = P(|X| \leqslant \Delta) \geqslant 1 - \sigma^2/\Delta^2.$$

Неравенство Чебышева устанавливает нижнюю границу доверительной вероятности. Действительная доверительная вероятность часто оказывается значительно больше. Поэтому неравенство Чебышева на практике применяется редко, только для грубых оценок.

При большом числе наблюдений ($n \geqslant 10 \div 20$) в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей распределение $\widetilde{A}_и$ можно приближенно считать нормальным при произвольных функциях распределения независимых величин A_i, причем

$$\sigma_и = \widetilde{\sigma}_и.$$

В этом случае доверительная вероятность

$$P_д = P\left(\widetilde{A}_и - \Delta_2 \leqslant A_и \leqslant \widetilde{A}_и + \Delta_1\right) \approx$$
$$\approx \left[\Phi\left(\Delta_2/\widetilde{\sigma}_и\right) + \Phi\left(\Delta_1/\widetilde{\sigma}_и\right)\right]/2.$$

Для симметричного доверительного интервала

$$P_д = P(|\widetilde{A}_и - A_и| \leqslant \Delta) = \Phi(\Delta/\widetilde{\sigma}_и).$$

Обратная задача, т. е. задача определения доверительного интервала по заданной доверительной вероятности, решается с помощью функции Ψ, обратной Φ. Так, половина длины симметричного доверительного интервала Δ равна

$$\Delta \approx \widetilde{\sigma}_и \Psi(P_д).$$

Значения функции Ψ можно найти по таблице, составленной для функции Φ.

При малом числе наблюдений ($n<10$) распределение среднеарифметического может отличаться от нормального распределения, а величина $\widetilde{\sigma}_и$ значительно отличаться от $\sigma_и$. В таком случае следует применять более точные методы расчета доверительной вероятности. Однако при этом необходимо знать априорно вид функции распределения результатов отдельных независимых наблюдений.

Применительно к наиболее распространенному нормальному распределению точный метод расчета доверительной вероятности базируется на распределении Стьюдента и доверительная вероятность вычисляется по формулам:

для несимметричного доверительного интервала

$$P_д = F_n\left(\frac{\Delta_1}{\widetilde{\sigma}_и}\right) + F_n\left(\frac{\Delta_2}{\widetilde{\sigma}_и}\right) - 1,$$

для симметричного доверительного интервала

$$P_д = 2F_n\left(\frac{\Delta}{\widetilde{\sigma}_и}\right) - 1,$$

где $F_n(t)$ — функция распределения Стьюдента. Зависимость $F_n(t)$ от параметров $t=\Delta/\widetilde{\sigma}_и$ и n представлена таблицей [6.5]. С помощью этой же таблицы может быть решена и обратная задача — определение доверительного интервала по заданной доверительной вероятности.

Обработка прямых измерений

Обработка измерений имеет цель — дать оценку истинному значению измеряемой величины и определить степень достоверности этой оценки. Здесь рассматривается случай, при котором систематической погрешностью результата измерения можно пренебречь (оценки систематических погрешностей результата измерения рассматриваются ниже), а о распределении случайных погрешностей ничего не известно.

Если выполнено только одно измерение и измерительный прибор дал показание A, то в качестве оценки $\widetilde{A}_и$ истинного значения измеряемой величины A следует принять это показание. Однако определить степень достоверности полученного результата измерения $\widetilde{A}_и$ невозможно, так как распределение случайных погрешностей неизвестно.

Если выполнено N независимых измерений одной и той же величины A ($N \geqslant 2$) и получено N результатов наблюдения $a_1, a_2, \ldots, a_i, \ldots, a_n$, то в качестве оценки истинного значения измеряемой величины берется среднеарифметическое результатов наблюдений

$$A_и = \widetilde{a}_и = \frac{\sum_{i=1}^{N} a_i}{N},$$

где a_i — результат отдельного наблюдения.

Точность полученной оценки истинного значения измеряемой величины (результата измерения) характеризуется оценкой дисперсии

$$D\left[\widetilde{A}_и\right] = \widetilde{d}_и \approx \frac{\sum_{i=1}^{N} \left(a_i - \widetilde{a}_и\right)^2}{N(N-1)}$$

или оценкой среднеквадратического отклонения

$$\widetilde{\sigma}_и = \sqrt{\widetilde{d}_и} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(a_i - \widetilde{a}_и\right)^2}{N(N-1)}}.$$

Точность метода измерения (точность одного результата наблюдения в полученной серии n результатов наблюдений) характеризуется соответственно величинами

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (a_i - \tilde{a}_и)^2}{N-1};$$

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (a_i - \tilde{a}_и)^2}{N-1}}.$$

Величина $\tilde{\sigma}_и$ позволяет дать количественную оценку степени достоверности результата измерения, т. е. найти значение доверительного интервала при заданной доверительной вероятности.

Пример [6.6]. Цифровым вольтметром произведено 10 независимых наблюдений одного и того же постоянного напряжения:

№ наблюдения	U_i, мВ	№ наблюдения	U_i, мВ
1	2785	6	2816
2	2841	7	2768
3	2773	8	2822
4	2857	9	2793
5	2792	10	2803

Разброс результатов наблюдений связан с наличием случайных погрешностей. Систематические погрешности отсутствуют. Требуется найти:

1) оценку $\tilde{U}_и$ истинного значения измеряемого напряжения;

2) характеристики точности метода измерения $\tilde{d}$ и $\tilde{\sigma}$, а также характеристику точности $\tilde{\sigma}_и$ оценки истинного значения измеряемого напряжения;

3) приближенное значение доверительной вероятности того, что истинное значение измеряемого напряжения отличается от $\tilde{U}_и$ не более чем на 20 мВ;

4) приближенное значение симметричного доверительного интервала, соответствующего доверительной вероятности 0,9.

Решение 1.

$$1.\ \tilde{U} = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_i}{n} = 2085 \text{ мВ}.$$

2. Для нахождения параметров $\tilde{d}$ и $\tilde{\sigma}$ необходимо предварительно вычислить разности вида $U_i - \tilde{U}_и$ и квадраты этих разностей. Результаты вычислений сведены в таблицу:

$U_i - \tilde{U}_и$	$(U_i - \tilde{U}_и)^2$	$U_i - \tilde{U}_и$	$(U_i - \tilde{U}_и)^2$
−20	400	+11	121
+36	1296	−37	1369
−32	1024	+17	289
+52	2704	−12	144
−13	169	− 2	4

Далее

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (U_i - \tilde{U}_и)^2}{N-1} = 836 \text{ мВ}^2;$$

$$\sigma = \sqrt{\tilde{d}} = 29 \text{ мВ};$$

$$\tilde{\sigma}_и = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = 9 \text{ мВ}.$$

3. А) Используя неравенство Чебышева и учитывая, что $\Delta = 20$ мВ, получаем:

$$P_д \geqslant 1 - \sigma_и^2/\Delta^2 \approx 1 - \sigma_и^2/\Delta^2 = 0{,}8.$$

На этом основании результат обработки наблюдений можно представить в виде

$$U = 2805 \pm 5 \text{ мВ}$$

с вероятностью, большей 0,8.

Б) Второй, более точный способ вычисления доверительной вероятности дает

$$P_д \approx \Phi\left(\frac{\Delta}{\tilde{\sigma}_и}\right) = \Phi\left(\frac{20}{9}\right) = 0{,}974.$$

На этом основании результат обработки наблюдений можно представить в виде

$$U = 2305 \pm 20 \text{ мВ}$$

с вероятностью, примерно равной 0,974.

4.

$$\Delta \approx \tilde{\sigma}_и \Psi(P_д) = 9 \cdot 1{,}645 \approx 15 \text{ мВ}.$$

На этом основании результат обработки наблюдений можно представить в виде

$$U = 2805 \pm 15 \text{ мВ}$$

с вероятностью, примерно равной 0,9.

Систематические погрешности измерений

Выделяют три источника систематических погрешностей: метод измерения, средство измерения и экспериментатор. В соответствии с этим систематические погрешности разделяют на методические, инструментальные и личные.

Методические погрешности обусловлены несовершенством метода измерения и влиянием средства измерений на объект, свойства которого измеряются. Например, потребление вольтметром тока из цепи измерения вызывает падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника измеряемого напряжения, что приводит к методической погрешности измерения.

Инструментальные — вызываются несовершенством средств измерений, например неточностью подгонки сопротивлений резисторов, неточной градуировкой, инерционностью функциональных узлов средств измерений и т. п.

Личные — систематические погрешности, связанные с индивидуальными особенностями наблюдения.

Обнаружение систематических погрешностей — сложная задача, особенно постоянных погрешностей, так как последние в процессе измерения ничем себя не проявляют. Поэтому и устранение систематических погрешностей производится не математической обработкой экспериментальных данных, а применением более точных методов измерений. Для этих целей в электроизмерительной технике наиболее часто пользуются методом замещения и методом компенсации погрешности по знаку.

Метод компенсации погрешности по знаку предполагает такую организацию эксперимента, в результате которой получают два наблюдения, причем систематическая погрешность в результат каждого из них входит с разными знаками. Полусумма полученных наблюдений дает результат измерения без систематической погрешности. Например, при измерении низкоомных сопротивлений мостом возможна систематическая погрешность, обусловленная термо-

ЭДС. Для исключения погрешности производят два измерения при различных полярностях питающего мост напряжения. В качестве результата измерения берут полусумму полученных наблюдений, которая свободна от влияния термо-ЭДС.

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата измерения оцениваются по ее составляющим в соответствии с ГОСТ 8.207-76. Если выявлен источник систематической погрешности и получена оценка погрешности, то она устраняется из результата измерения путем введения поправки. Поправка равна погрешности с обратным знаком. Однако чаще анализ позволяет установить лишь границы составляющих систематической погрешности и возникает задача оценки систематической погрешности результата измерения путем суммирования ее составляющих.

При большом числе составляющих, равноценных по своему вкладу в общую погрешность, результирующее распределение можно считать нормальным. Дисперсию такого распределения определяют по оценкам дисперсий составляющих.

При малом числе составляющих (две, три) результирующую погрешность находят путем их арифметического суммирования. Однако такой подход дает завышенное значение результирующей погрешности.

Если число составляющих не велико и известны границы интервалов θ_i, в пределах которых находится каждая составляющая x_i систематической погрешности ($-\theta_i \leqslant x \leqslant \theta_i$), то результирующую погрешность θ рекомендуется (ГОСТ 8.207-76) вычислять по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \theta_i^2},$$

где k — поправочный коэффициент.

Коэффициент k зависит от числа слагаемых N и доверительной вероятности $P_д$, однако при $P_д \leqslant 0{,}99$ его зависимость от N слабая и для расчетов можно пользоваться усредненным значением k независимо от числа слагаемых N:

$P_д$	0,90	0,95	0,98	0,99
k	0,95	1,1	1,3	1,4

При этом отклонение k от действительных значений не превышает ± 10 %.

Вычисление результирующей погрешности θ при малых $n = 2 \div 3$ может дать результат, превышающий арифметическую сумму θ_i, что противоречит здравому смыслу. В таком случае θ следует вычислять как арифметическую сумму θ_i.

Таким образом, при вычислениях результирующей систематической погрешности θ рекомендуется пользоваться соотношениями:

$$\theta = \begin{cases} k \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \theta_i^2}, & \text{если } k \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \theta_i^2} < \sum_{i=1}^{N} \theta_i; \\ \sum_{i=1}^{N} \theta_i, & \text{если } k \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \theta_i^2} \geqslant \sum_{i=1}^{N} \theta_i. \end{cases}$$

Оценка систематических погрешностей производится на основе нормативных данных о характеристиках используемых средств измерений. При этом учитываются пределы допускаемой основной погрешности Δ_0, пределы имевших место в данном эксперименте дополнительных погрешностей θ_i и методические погрешности. Личные погрешности в этом случае обычно не учитываются ввиду их малости.

Суммирование составляющих погрешности измерения выполняется статистически с учетом вида функций распределений составляющих. Если сведения о виде функций распределений составляющих отсутствуют, то применяется допущение о равномерности функций распределения составляющих. Методику приближенной оценки систематической погрешности результата измерения проиллюстрируем следующим примером.

Вольтметром класса 0,5 (ГОСТ 8.401-80 и ГОСТ 8711-78) измеряется напряжение на выводах активного двухполюсника. Внутреннее сопротивление активного двухполюсника $R \leqslant 300$ Ом. Вольтметр имеет диапазон измерений 0—300 В и сопротивление $R_в = 300$ кОм. Показание прибора 201,5 В. Внешние условия: окружающая температура +30 °С, магнитная индукция $5 \cdot 10^{-4}$ Тл. Остальные условия измерения нормальные. Априори известно, что измеряемое напряжение неизменно, и поэтому в повторных наблюдениях нет необходимости. Требуется оценить погрешность измерения.

Дадим оценку составляющим погрешности измерения.

Методическая погрешность, обусловленная падением напряжения на внутреннем сопротивлении активного двухполюсника, создаваемым током, протекающим через вольтметр, в относительной форме равна:

$$\theta \approx -\frac{R}{R_в + R} 100 = -\frac{300}{300 \cdot 300} 100 \approx 0{,}1\%.$$

Методическая погрешность существенно меньше основной, и поэтому ею можно пренебречь.

Границы основной относительной погрешности прибора

$$\theta_0 = \pm \frac{0{,}5 \cdot 300}{201{,}5} \pm 0{,}75\ \%.$$

Границы дополнительной погрешности от влияния магнитного поля $\theta_н = \pm 0{,}5$ %.

Границы дополнительной погрешности от изменения окружающей температуры на 10 °С относительно нормального значения $\theta_t = \pm 0{,}5$ % .

Личные погрешности входят в основную.

Найдем доверительные границы погрешности результата измерения для $P_д = 0{,}95$ ($k = 1{,}1$):

$$\theta = k \sqrt{\theta_0^2 + \theta_н^2 + \theta_t^2} =$$

$$= 1{,}1 \sqrt{0{,}75^2 + 0{,}5^2 + 0{,}5^2} \approx 1{,}1\ \%.$$

Данное измерение не является точным, поэтому полученный результат можно округлить и принять $\theta = 1$ %. Границы абсолютной погрешности результата измерения равны $\Delta = \pm 2$ В. Следовательно, последняя цифра в числовом значении показания прибора недостоверна и ее надо исключить, пользуясь правилами округлений.

Результат измерения в окончательной форме примет вид: $U = 201 \pm 2$ В; $P_д = 0{,}95$.

Представление результатов измерений

Окончательный результат измерения представляется в виде значения измеряемой величины и показателей точности. Показатели точности измерений, способы выражения точности измерения и формы представления результатов измерений определены ГОСТ 8.011-72.

ГОСТ 8.011-72 устанавливает следующие показатели точности измерений:

интервалы, в которых с заданной вероятностью находится погрешность измерения или ее систематическая составляющая;

числовые характеристики систематической и случайной составляющей погрешности измерения;

функции распределения (плотность вероятности) систематической и случайной составляющих погрешности измерения.

Точность измерения в зависимости от назначения измерений и характера использования их результатов согласно ГОСТ 8.011-72 должна выражаться одним из следующих способов:

доверительным интервалом и доверительной вероятностью суммарной погрешности измерения;

доверительным интервалом и доверительной вероятностью систематической составляющей погрешности, стандартной аппроксимацией функции распределения и среднеквадратическим отклонением случайной составляющей погрешности измерения;

стандартными аппроксимациями функций распределения и среднеквадратическими отклонениями как систематической, так и случайной составляющих погрешности измерения;

функциями распределения систематической и случайной составляющих погрешности измерения.

Численные показатели точности должны выражаться в единицах измеряемой величины; содержать не более двух значащих цифр; наименьшие разряды численных показаний точности и числовых значений результата измерения должны быть одинаковыми.

При оформлении результатов нескольких измерений, характеризующихся одинаковыми значениями показателей точности, последние указываются один раз для всех результатов измерений.

ГОСТ 8.011-72 устанавливает четыре возможные формы представления результатов измерения в зависимости от способа выражения точности измерения.

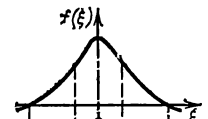
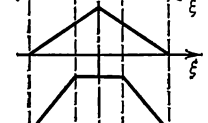
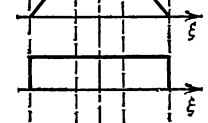
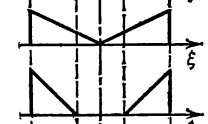
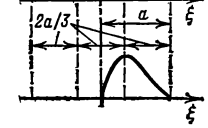
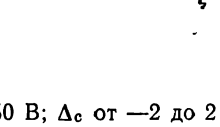
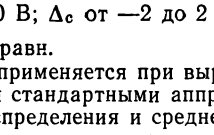
Первая форма. При выражении точности измерений доверительным интервалом и доверительной вероятностью суммарной погрешности измерения указываются: A; Δ от $\Delta_н$ до $\Delta_в$; P; где A — результат измерения в единицах измеряемой величины; Δ, $\Delta_н$, $\Delta_в$ — погрешность измерения; ее нижняя и верхняя границы в тех же единицах; P — доверительная вероятность.

Пример. 220 В; Δ от —2 до +2 В; $P=0{,}95$.

Первая форма представления результата измерения применяется на практике наиболее часто: в случае разовых измерений, результаты которых используются для принятия тех или иных решений; при контроле и т. п.

Вторая форма применяется в случае выражения точности измерений доверительным интервалом и доверительной вероятностью систематической составляющей погрешности измерения, стандартной аппроксимацией функции распределения и среднеквадратическим отклонением случайной составляющей погрешности измерения. В данном случае указываются: A; Δ_c от $\Delta_{c,н}$ до $\Delta_{c,в}$; P_c; $\sigma(\Delta)$; $f_{\Delta}^{\circ\,ст}(\xi)$, где A — результат измерения в единицах измеряемой величины; Δ_c, $\Delta_{c,н}$, $\Delta_{c,в}$ — систематическая составляющая погрешности измерения, ее нижняя и верхняя границы в тех же единицах; P_c — доверительная вероятность; $\sigma(\Delta)$ — оценка среднеквадратического отклонения случайно составляющей погрешности измерения в единицах измеряемой величины; $f_{\Delta}^{\circ\,ст}(\xi)$ — стандартная аппроксимация функции плотности вероятности случайной составляющей погрешности измерения, выбирается из перечня в табл. 6.4.

Таблица 6.4. **Стандартные аппроксимации функций распределения (ГОСТ 8.011-72)**

Наименование функции	Сокращенное обозначение	График	σ
Нормальная (усеченная)	норм.		3
Треугольная (Симпсона)	Δ		2,4
Трапециевидная	трап.		2,3
Равномерная	равн.		1,7
Антимодальная I	ам I		1,5
Антимодальная II	ам II		$a=1{,}8$
Релея (усеченная)	—		3,3

Пример. 250 В; Δ_c от —2 до 2 В; $P_c=0{,}95$; $\sigma(\Delta)=1$ В; равн.

Третья форма применяется при выражении точности измерений стандартными аппроксимациями функций распределения и среднеквадратическими отклонениями как систематической, так и случайной составляющих погрешности измерения, при этом указываются: A; $\tilde{\sigma}(\Delta_c)$; $f_{\Delta_c}^{ст}(\xi)$; $\tilde{\sigma}(\Delta)$; $f_{\Delta}^{\circ\,ст}(\xi)$, где $\tilde{\sigma}(\Delta_c)$ и $\tilde{\sigma}(\Delta)$ — оценки среднеквадратических отклонений систематической и случайной погрешности измерения в единицах измеряемой величины; $f_{\Delta_c}^{ст}(\xi)$ и $f_{\Delta}^{\circ\,ст}(\xi)$ — стандартная аппроксимация функции распределения систематической и случайной погрешностей, выбираемые из перечня в табл. 6.4.

Пример. 23,05 В; $\tilde{\sigma}(\Delta_c)=0{,}02$ В; равн.; $\tilde{\sigma}^{\circ}(\Delta)=0{,}01$ В; норм.

Третью форму представления результата измерения следует применять в тех случаях, когда возникает необходимость в последующем суммировать обе составляющие погрешности, например при определении составляющих погрешности результата косвенных измерений.

Четвертая форма используется при выражении точности измерений функциями распределения систематической и случайной составляющих погрешности измерения, при этом указываются: A; $f_{\Delta_c}(\xi)$; $f^{\circ}_{\Delta}(\xi)$, где $f_{\Delta_c}(\xi)$, $f^{\circ}_{\Delta}(\xi)$ — функции плотности вероятностей систематической и случайной составляющих погрешностей измерения; обе функции должны задаваться в одинаковом виде таблицами, графиками или формулами.

Пример. 215 В; $f_{\Delta_c}(\xi)=0{,}2$ В$^{-1}$ при -1 В$\leqslant\xi<1$ В; $f^{\circ}_{\Delta}(\xi)=0$ при -1 В$>\xi\geqslant 1$ В;

$$f^{\circ}_{\Delta}(\xi)=\frac{1}{2\sqrt{2\pi}}e^{-\xi^2/8}\ \text{В}^{-1}.$$

Четвертая форма представления результата измерения применяется в сложных и ответственных экспериментах.

6.3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерение напряжений и токов

Измерение напряжений и токов производится измерительными приборами, основанными на методе непосредственной оценки или методе сравнения.

Приборы, основанные на методе непосредственной оценки, представляют собой сочетание измерительного механизма с измерительным преобразователем. Применяются следующие системы измерительных механизмов: магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, ферродинамическая, электростатическая. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы реагирует на среднее значение тока, электростатической системы — на действующее значение напряжения, прочих — на действующее значение тока, протекающего через измерительный механизм.

Основное достоинство измерительного механизма магнитоэлектрической системы — малая в сравнении с другими системами (кроме электростатической) потребляемая мощность. Поэтому для измерения постоянных токов и напряжений рекомендуется применять приборы на основе этого механизма.

Приборы на основе измерительного механизма магнитоэлектрической системы в сочетании с выпрямительным, термоэлектрическим и электронным измерительными преобразователями применяются для измерений переменных токов и напряжений. Их называют выпрямительными, термоэлектрическими и электронными приборами соответственно.

При измерении вольтметр подключается к выводам электрической цепи, напряжение между которыми измеряется. Амперметр включается в рассечку цепи. Приборы могут быть постоянно включены в цепь или включаться только для измерения и затем выключаться. В последнем случае мощность, потребляемая прибором (конечное значение его входного сопротивления), приводит к погрешностям. Покажем это на примере измерения напряжения холостого хода на выводах активного двухполюсника (рис. 6.3). До замыкания ключа K напряжение на выводах активного двухполюсника равно E. После замыкания ключа в цепи возникает ток I и напряжение на выводах двухполюсника снижается вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении двухполюсника:

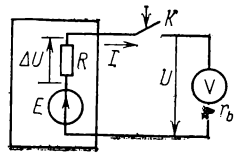


Рис. 6.3. Измерение напряжения активного двухполюсника

$$\Delta U = IR = E\frac{R}{R+r_{\text{в}}}.$$

Результат измерения равен $U=E_x-\Delta U$. Отсюда погрешность измерения

$$\delta=\frac{U-E}{E}=-\frac{R}{R+r_{\text{в}}}\approx\frac{R}{r_{\text{в}}}.$$

Снизить указанную погрешность можно только выбором вольтметра с достаточно большим по сравнению с R входным сопротивлением.

Применительно к измерению тока амперметром требование снижения методической погрешности заключается в выборе амперметра с пренебрежимо малым собственным сопротивлением по сравнению с сопротивлением цепи, в которой измеряется ток.

Расширение пределов измерения приборов, основанных на методе непосредственной оценки, осуществляется посредством добавочных резисторов, делителей напряжения, шунтов и трансформаторов тока и напряжения. На рис. 6.4 показаны схемы включения приборов с указанными преобразователями.

Добавочные резисторы выполняются внутренними (располагаются внутри корпуса при-

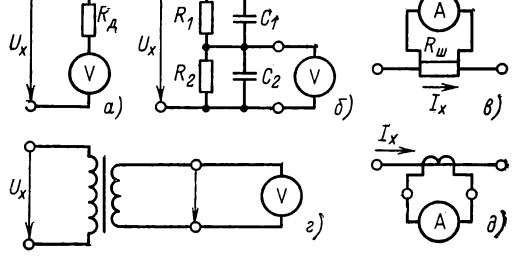


Рис. 6.4. Схемы включения приборов при измерении напряжений и токов:

а — вольтметр с добавочным резистором; *б* — вольтметр с делителем напряжения; *в* — амперметр с шунтом; *г* — вольтметр с трансформатором напряжения; *д* — амперметр с трансформатором тока

бора) или наружными. В переносных приборах добавочные резисторы обычно выполняются секционными на несколько пределов измерения. Номинальные токи добавочных резисторов составляют 3,5 и 7,5 мА. Диапазон напряжений постоянного тока, измеряемых вольтметрами с добавочными резисторами, составляет 600—5000 В. Основная погрешность добавочных резисторов лежит в пределах 0,1—0,5 %.

Делители постоянного напряжения содержат только резисторы, а переменного — дополнительные конденсаторы. Дело в том, что входное сопротивление вольтметра, включенного на выход делителя напряжения, содержит заметную емкостную составляющую, которая вместе с распределенной емкостью резистора R_2 представлена конденсатором C_2 (рис. 6.4, *б*). Для того чтобы коэффициент передачи делителя не зависел от частоты измеряемого напряжения, в схему вводится дополнительный конденсатор C_1, емкость которого должна удовлетворять условию $C_1R_1=C_2R_2$. При этом коэффициент передачи делителя от частоты измеряемого напряжения не зависит. Коэффициент деления делителей обычно выбирается кратным 10. Делители рассчитываются на входные напряжения до 1000 В. Минимальная основная погрешность коэффициента деления делителей лежит в пределах 0,01—0,0005 %.

Шунты обеспечивают измерение токов до 6000 А. Если измеряемые токи превышают 50—100 А, то применяются наружные шунты. Шунты изготавливаются на номинальные падения напряжения 60, 75, 100, 150 и 300 мВ. Основная погрешность шунтов лежит в пределах 0,005—0,5 %.

Трансформаторы напряжения и тока предназначены для преобразования измеряемых напряжений и токов в стандартные: $100/\sqrt{3}$, 150 В, 100 В, $100/\sqrt{3}$ Б, 100/3 В и 5 А (реже 1; 0,5; 0,3; 0,125 А); кроме того, они обеспечивают гальваническое разделение цепей.

Точность трансформаторов характеризуется погрешностью коэффициента трансформации и угловой погрешностью. Последняя определяется как угол сдвига между вектором первичной величины и вектором вторичной величины и выражается в угловых минутах. Если вектор вторичной величины опережает первичный, погрешность считается положительной, в противном случае — отрицательной.

Трансформаторы напряжения применяются в цепях с переменным напряжением до 15 000 В, выпускаются следующих классов точности 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1 и 3. Угловая погрешность лежит в пределах от ±2 до ±100 в зависимости от класса и нагрузки.

Трансформаторы тока применяются для измерений переменных токов до 10 000 А, выпускаются следующих классов точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3 и 10. Угловая погрешность лежит в пределах от ±2 до ±120 в зависимости от класса точности и нагрузки.

Точное измерение напряжений и токов производится с помощью компенсаторов или цифровых вольтметров.

Измерение параметров электрических цепей

Для измерения параметров электрических цепей — сопротивления, емкости, индуктивности и взаимной индуктивности применяются приборы непосредственной оценки, сравнения и комбинированные приборы.

Приборы непосредственной оценки применяются при сравнительно грубых измерениях и строятся на основе логометров. Точность измерения такими приборами обычно не превышает 1 %.

Комбинированные приборы обычно представляют собой вольтметр постоянного тока, содержащий преобразователи параметров электрической цепи в постоянное напряжение, которое измеряется вольтметром. Точность измерения в данном случае зависит от типа применяемого вольтметра и качества преобразователей. Комбинированные приборы на основе цифрового вольтметра обеспечивают высокую точность измерения параметров электрической цепи (например, приборы моделей Ф4801, Щ68002 и др.).

Наиболее распространенными приборами сравнения, предназначенными для измерения параметров электрических цепей, являются мосты. Мостом называется электрическая цепь, в которой можно выделить две ветви с взаимным сопротивлением, равным бесконечности при определенном соотношении между сопротивлениями цепи и равным конечному значению, если соотношение между сопротивлениями цепи изменяется.

Четырехплечий мост (рис. 6.5) содержит четыре резистора $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$, $\underline{Z}_4$, включенных в виде кольца. Точки *a*, *b*, *c*, *d* называют вершинами моста, цепь между двумя смежными вершинами — плечом моста, а между двумя противоположными вершинами — диагональю моста. В одну диагональ включен источник питания (диагональ *ab* на рис. 6.5), ее называют диагональю питания. Другая диагональ содержит нагрузку, ее называют диагональю нагрузки или выходной; в эту диагональ включается сравнивающее устройство (СУ) или показывающий прибор.

В зависимости от рода тока в диагонали питания моста различают мосты постоянного и переменного тока.

В зависимости от режима выходной диагонали различают мосты — уравновешенные, неуравновешенные и квазиуравновешенные.

При определенном соотношении сопротивлений плеч моста ток и напряжение в диагонали нагрузки равны нулю независимо от значения напряжения в диагонали питания, такой мост называют уравновешенным. Уравнение, устанавливающее соотношение между сопротивлениями плеч уравновешенного моста, называют уравнением (условием) равновесия моста.

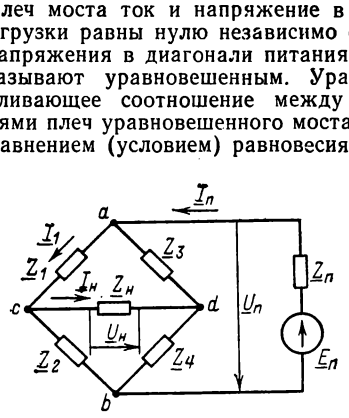


Рис. 6.5. Четырехплечий мост

Для четырехплечего моста это уравнение имеет вид

$$\underline{Z}_1\underline{Z}_4 = \underline{Z}_2\underline{Z}_3.$$

Если известно, что мост уравновешен и заданы сопротивления трех его плеч, то сопротивление четвертого плеча вычисляется из уравнения равновесия.

В неуравновешенных мостах о значении измеряемого сопротивления судят по току или напряжению в диагонали нагрузки.

Квазиуравновешенные мосты представляют собой разновидность мостов переменного тока, в которых уравновешивание осуществляется только по одной из составляющих измеряемого комплексного сопротивления — модулю, фазе, активной или реактивной составляющей. Достигается это путем применения специальных сравнивающих устройств. Такие мосты называют также полууравновешенными.

Уравновешенные мосты. Разновидности мостов постоянного тока ограничены двумя вариантами — четырехплечим (одинарным) и двойным.

Если измеряемое сопротивление включено в первое плечо моста и мост уравновешен, то

$$R_1 = R_3 R_2 / R_4.$$

Обычно мост приводится к равновесию плавной регулировкой R_3. Плечи моста, содержащие R_2 и R_4, называют плечами отношения и регулируются с кратностью 10^n (n=... —2; —1; 0; +1; +2 ...). С помощью плеч отношения устанавливается диапазон показаний моста.

Различают три способа подключения измеряемых сопротивлений к мосту — по двух-, трех- и четырехпроводной схемам (рис. 6.6). Двухпроводная схема (рис. 6.6, *а*) применяется в случае измерения сопротивлений средних и больших значений (более 10 Ом); трехпроводная схема (рис. 6.6, *б*) — в случае измерения небольших изменений сопротивления, удаленного от моста на некоторое расстояние; обычно эта схема применяется в технике измерения неэлектрических величин электрическими методами, например температуры термометром сопротивления. Четырехпроводная схема (рис. 6.6, *в*) применяется для измерения низкоомных сопротивлений (менее 10 Ом).

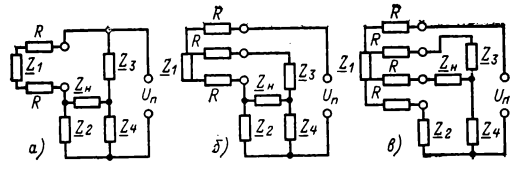


Рис. 6.6. Способы подключения измеряемого сопротивления к мосту:

а — двухпроводная схема; *б* — трехпроводная схема; *в* — четырехпроводная схема; *R* — сопротивление соединительного проводника

Измерение малых сопротивлений (менее 10 Ом) производится также двойным мостом (рис. 6.7). Измеряемое сопротивление R_x включается последовательно с опорным R_0, значение которого выбирается одного порядка с R_x, и подключается к источнику тока. При равновесии моста справедливо

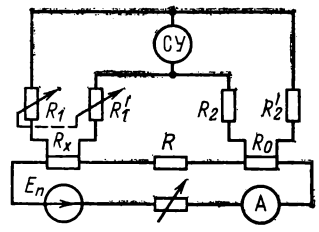


Рис. 6.7. Двойной мост

$$R_x = R_0\frac{R_1'}{R_2} + R\frac{R_1}{R + R_1' + R_2'} \times \times \left(\frac{R_2'}{R_2} - \frac{R_1'}{R_1}\right),$$

где R — сопротивление проводника, соединяющего R_x с R_0.

В схеме моста выполняется условие $R_1 = R_1'$ и $R_2 = R_2'$; кроме того, проводник, соединяющий R_x с R_0, выбирают коротким и большого сечения, чтобы снизить значение R и его влияние на результат измерения. При этом уравнение равновесия упрощается:

$$R_x = R_0 R_1 / R_2.$$

Схемы мостов переменного тока более разнообразны. На рис. 6.8, *а—е* представлены некоторые варианты мостов и уравнения для определения измеряемых параметров при условии, что мост уравновешен. Поскольку измеряемые величины характеризуются двумя параметрами (C_x и tg δ; L_x и R_x) и уравнение равновесия моста распадается на два отдельных уравнения, то уравновешивание мостов производится двумя элементами.

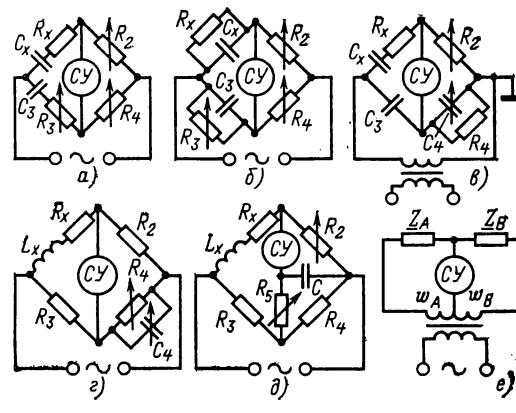


Рис. 6.8. Схемы мостов переменного тока:

а — $C_x = C_3R_4/R_2$, $R_x = R_3R_2/R_4$, $\operatorname{tg}\delta = \omega R_3 C_3$;

б — $C_x = C_3R_4/R_2$, $R_x = R_3R_2/R_4$, $\operatorname{tg}\delta = 1/\omega R_3 C_3$;

в — $C_x = C_4R_1/R_2$, $R_1 = R_2C_4/C_3$, $\operatorname{tg}\delta = \omega R_4 C_4$;

г — $L_x = R_2R_3C_4$, $R_x = R_3R_2/R_4$;

д — $C = C_x = R_2[R_5(R_3 + R_4) + R_3R_4]/R_4$, $R_x = R_3R_2/R_4$;

е — $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B w_A/w_B$

Таблица 6.5. **Чувствительность четырехплечих мостов**

Обозначение	Определение	Выражение чувствительности через		
		ЭДС источника питания	ток источника питания	ток в измеряемом сопротивлении
$\underline{S}_{I0}$	$\frac{d\underline{I}_н}{d\underline{Z}_1}$	$-\frac{\underline{E}_п}{\underline{Z}_{10}^2(1+m)(1+n)(1+\underline{K}_н)(1+\underline{K}_п)}$	$-\frac{\underline{I}_п}{\underline{Z}_{10}}\frac{n}{(1+n)^2(1+\underline{K}_н)}$	$-\frac{\underline{I}_{10}}{\underline{Z}_{10}(1+n)(1+\underline{K}_н)}$
$\underline{S}_{U0}$	$\frac{d\underline{U}_н}{d\underline{Z}_1}$	$-\frac{\underline{E}_п\underline{Z}_н}{\underline{Z}_{10}^2(1+m)(1+n)(1+\underline{K}_н)(1+\underline{K}_п)}$	$-\underline{I}_н\frac{\underline{Z}_н}{\underline{Z}_{10}}\frac{n}{(1+n)^2(1+\underline{K}_н)}$	$-\frac{\underline{I}_{10}\underline{Z}_н}{\underline{Z}_{10}(1+n)(1+\underline{K}_н)}$
$\underline{T}_0$	$\frac{d\underline{U}_{н.х}}{d\underline{Z}_1}$	$-\frac{\underline{E}_п}{\underline{Z}_{10}}\frac{m}{(1+m)^2}\frac{1}{1+\underline{K}_п}$	$-\underline{I}_п\frac{mn}{(1+m)(1+n)}$	$-\underline{I}_{10}\frac{m}{1+m}$
$\underline{S}'_{I0}$	$\frac{d\underline{I}_н}{d\underline{Z}_1}\underline{Z}_{10}$	$-\frac{\underline{E}_п}{\underline{Z}_{10}(1+m)(1+n)(1+\underline{K}_н)(1+\underline{K}_п)}$	$-\underline{I}_п\frac{n}{(1+n)^2(1+\underline{K}_н)}$	$-\frac{\underline{I}_{10}}{(1+n)(1+\underline{K}_н)}$
$\underline{S}'_{U0}$	$\frac{d\underline{U}_н}{d\underline{Z}_1}\underline{Z}_{10}$	$-\frac{\underline{E}_п\underline{Z}_н}{\underline{Z}_{10}(1+m)(1+n)(1+\underline{K}_н)(1+\underline{K}_п)}$	$-\underline{I}_п\underline{Z}_н\frac{n}{(1+n)^2(1+\underline{K}_н)}$	$-\underline{I}_{10}\frac{\underline{Z}_н}{(1+n)(1+\underline{K}_н)}$
$\underline{T}'_0$	$\frac{d\underline{U}_{н.х}}{d\underline{Z}_1}\underline{Z}_{10}$	$-\underline{E}_п\frac{m}{(1+m)(1+\underline{K}_п)}$	$-\underline{I}_п\underline{Z}_{10}\frac{mn}{(1+m)(1+n)}$	$-\underline{I}_{10}\underline{Z}_{10}\frac{m}{1+m}$

Погрешность измерения сопротивлений четырехплечим мостом при условии, что влиянием сопротивлений подводящих проводников и проводимости изоляции плеч моста можно пренебречь, зависит от погрешности подгонки сопротивлений в плечах моста и конечного значения его чувствительности.

Обозначим $\underline{Z}_i=\underline{Z}_{iн}(1+\delta_i)$, где δ_i — относительная погрешность сопротивления плеч моста. Допустим, что измеряемое сопротивление включено в первое плечо моста и в результате измерения получено значение $\underline{Z}_1$, которое вследствие наличия погрешностей сопротивлений других плеч моста отличается от действительного значения $\underline{Z}_1=\underline{Z}_{10}(1+\delta_1)$. Тогда для погрешностей, которые выражаются действительными числами, $\delta_1=\delta_2+\delta_3-\delta_4$.

Недостаточная чувствительность моста также приводит к погрешности измерения $\delta_{пор}$ из-за невозможности определить точное значение сопротивлений плеч моста, при которых он уравновешен. Ввести поправку на эту составляющую погрешности невозможно, ей можно дать только приближенную оценку:

$$\delta_{пор} \leqslant \frac{U_{пор}}{\left|S_{I0}\frac{\underline{Z}_2\underline{Z}_3}{\underline{Z}_4}\underline{Z}_{су}\right|} = \frac{U_{пор}}{\left|T_0\frac{\underline{Z}_2\underline{Z}_3}{\underline{Z}_4}\right|},$$

где $U_{пор}$ — пороговое напряжение сравнивающего устройства; S_{I0}, T_0 — чувствительности моста по току и напряжению; $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$, $\underline{Z}_4$ — сопротивления плеч моста; $\underline{Z}_{су}$ — входное сопротивление сравнивающего устройства.

Снизить указанную погрешность можно только обеспечением высокой чувствительности моста и выбором сравнивающего устройства с достаточно малым пороговым значением напряжения.

В табл. 6.5 представлены выражения чувствительности четырехплечих мостов вблизи положения равновесия через ЭДС источника питания, ток источника питания и ток в измеряемом сопротивлении. Обозначения: $I_н$, $U_н$ — ток и напряжение в диагонали нагрузки моста; $U_{н.х}$ — напряжение в диагонали нагрузки в режиме холостого холода; $\underline{Z}_{10}$ — значение измеряемого сопротивления $\underline{Z}_1$, при котором мост уравновешен; $m=\underline{Z}_2/\underline{Z}_{10}$; $n=\underline{Z}_3/\underline{Z}_{10}$; $\underline{K}_п$, $\underline{K}_н$ — соответственно коэффициенты согласования диагоналей питания и нагрузки с мостом:

$$\underline{K}_п = \frac{\underline{Z}_п}{\underline{Z}_{10}}\frac{1+n}{n(1+m)};$$

$$\underline{K}_н = \frac{\underline{Z}_н}{\underline{Z}_{10}}\frac{1+m}{m(1+n)};$$

$\underline{Z}_п$ — внутреннее сопротивление источника питания; $\underline{Z}_н$ — сопротивление в диагонали нагрузки; $\underline{E}_п$ — ЭДС источника питания; $\underline{I}_п$ — ток источника питания; $\underline{I}_{10}$ — ток в измеряемом сопротивлении при равновесии моста.

Неуравновешенные мосты. В общем случае зависимость между приращениями тока $\Delta\underline{I}_н$ или напряжения $\Delta\underline{U}_н$ в диагонали нагрузки от изменения измеряемого сопротивления $\Delta\underline{Z}$ определяется уравнениями:

$$\Delta\underline{I}_н = \underline{I}_{н\infty}\frac{\lambda}{1+\lambda};$$

$$\Delta\underline{U}_н = \underline{U}_{н\infty}\frac{\lambda}{1+\lambda};$$

где $\underline{I}_{н\infty}$ и $\underline{U}_{н\infty}$ — ток и напряжение в диагонали нагрузки при $\Delta\underline{Z}\to\infty$, т. е. при обрыве цепи, содержащей измеряемое сопротивление $\underline{Z}_1$; $\chi=\Delta\underline{Z}/\underline{Z}_{11}$, где $\underline{Z}_{11}$ — входное сопротивление цепи по отношению к плечу моста, содержащему $\underline{Z}_1$.

В случае мостов постоянного и переменного тока, содержащих только активные сопротивления, рассматриваемые уравнения содержат действительные величины и графически представляют собой гиперболу. Линеаризовать эту зависимость можно путем выбора большего значения Z_{11} по сравнению с ΔZ_{max}. Если мост может быть откалиброван при значении $\Delta Z=\Delta Z_{max}$, то погрешность нелинейности, %,

$$\delta_н \leqslant -\frac{\Delta Z_{max}}{4Z_{11}}\,100.$$

Учитывая обозначения, принятые для уравновешенных мостов, можно показать, что для неуравновешенных четырехплечих мостов

$$\underline{I}_{н\infty} = \frac{\underline{E}_п}{\underline{Z}_{10}\left[(1+m\,\underline{K}_н)\,\underline{K}_п+(1+\underline{K}_н)(1+n)+m\right]} = \underline{I}_{10}\frac{(1+m)(1+\underline{K}_п)}{(1+m+\underline{K}_н)\,\underline{K}_п+(1+n)(1+\underline{K}_н)+m};$$

$$\underline{U}_{н\infty} = \frac{\underline{E}_п}{\left(1+\frac{1}{m}\right)\left(1+\frac{\underline{K}_п}{1+n}\right)} = \underline{I}_{10}\,\underline{Z}_{10}\,m\,\frac{1+\underline{K}_н}{1+\frac{\underline{K}_п}{1+n}};$$

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{10}\times\frac{(1+m)(1+n)(1+\underline{K}_н)(1+\underline{K}_п)}{(1+m+\underline{K}_н)\,\underline{K}_п+(1+n)(1+\underline{K}_н)+m}.$$

Часто мостовая цепь питается от стабилизированного источника питания с пренебрежимо малым выходным сопротивлением ($\underline{Z}_п=0$). В этом случае справедливо:

$$\underline{I}_{н\infty} = \frac{\underline{E}_п}{\underline{Z}_{10}\left[(1+n)(1+\underline{K}_н)+m\right]} = \underline{I}_{10}\frac{1+m}{(1+n)(1+\underline{K}_н)};$$

$$\underline{U}_{н\infty} = \frac{\underline{E}_п}{1+\frac{1}{m}} = \underline{I}_{10}\,\underline{Z}_{10}\,m;$$

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{10}\,\frac{(1+m)(1+n)}{1+n+\frac{m}{1+\underline{K}_н}}.$$

Измерение мощности

Измерение мощности в цепях постоянного и переменного тока, в том числе трехфазных, трех- и четырехпроводных, производится электродинамическими и ферродинамическими ваттметрами. Электродинамические ваттметры имеют классы точности 0,1; 0,2; 0,5; ферродинамические — 1,0; 1,5; 2,5. Последние применяются при технических измерениях. Область применения электродинамических ваттметров — цепи постоянного и переменного тока с частотой до нескольких тысяч герц, ферродинамических ваттметров — ограничена цепями промышленной частоты 50 Гц. Измерение мощности на высоких частотах производится электронными ваттметрами. Если ваттметр имеет неградуированную шкалу, что бывает у многодиапазонных ваттметров, то перед его применением вычисляется постоянная ваттметра (цена деления) $C_н$ по формуле

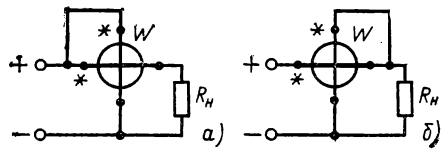


Рис. 6.9. Схемы включения ваттметра

$$C_н = U_н\,I_н/a_н,$$

где $U_н$ — номинальное напряжение выбранного поддиапазона измерения; $I_н$ — номинальный ток выбранного поддиапазона измерения; $a_н$ — номинальное число делений шкалы ваттметра.

Измерение мощности в цепях постоянного тока

По определению мощность, выделяемая в нагрузке, есть произведение тока нагрузки I на напряжение U на выводах нагрузки. Отсюда следует, что мощность может быть измерена путем раздельного измерения напряжения и тока в нагрузке и последующего вычисления. Однако на практике предпочтение отдается одноэлементным электродинамическим ваттметрам. Возможны две схемы включения ваттметра (рис. 6.9): схема на рис. 6.9, *а* рекомендуется для измерения мощности в высокоомной нагрузке, на рис. 6.9, *б* — для измерения мощности в низкоомной нагрузке. При включении ваттметра следует обращать внимание на правильность включения генераторных выводов обеих обмоток (генераторные выводы на рис. 6.9 помечены звездочкой).

Измерение активной мощности в цепях переменного тока

Измерение активной мощности в двухпроводной цепи переменного тока производится одним одноэлементным ваттметром, который включается аналогично рис. 6.9. При измерениях в трехфазных цепях также используются одноэлементные ваттметры, но количество приборов может быть разным: один, два или три. В соответствии с этим различают методы одного, двух или трех приборов. Технические измерения в трехфазных цепях производятся обычно посредством специальных двух- или трехэлементных ваттметров. Расширение диапазона измерения производится посредством трансформаторов тока и напряжения.

В случае полностью симметричной трехфазной, трехпроводной цепи (симметрия напряжений, равномерная нагрузка фаз и одинаковые углы сдвига между векторами токов и на-

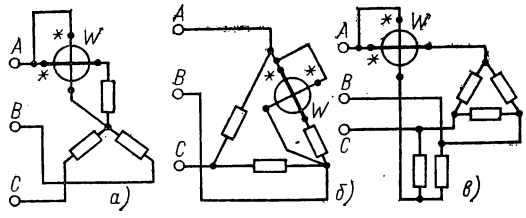


Рис. 6.10. Схемы включения одного ваттметра для измерения активной мощности:

а — для нагрузки вида звезда; *б* — для нагрузки вида треугольника; *в* — для нагрузки с недоступной средней точкой

пряжений) измерение активной мощности возможно одним прибором, включенным, как показано на рис. 6.10. На рис. 6.10, *в* показано включение ваттметра в случае, если средняя точка недоступна. В таком случае искусственная точка создается с помощью двух резисторов, сопротивление которых равно сопротивлению параллельной обмотки ваттметра. Полная мощность трехфазной цепи во всех трех вариантах включения ваттметра определяется по формуле

$$P = 3P_W,$$

где P_W — показание ваттметра.

Измерение активной мощности методами двух и трех приборов

Метод двух приборов предполагает включение двух одноэлементных ваттметров (рис. 6.11). Результат измерения не зависит от схемы соединения и характера нагрузки как при симметрии, так и при асимметрии токов и напряжений. По этой же схеме включается и двухэлементный ваттметр.

Сумма показаний обоих ваттметров равна полной мощности трехфазной цепи

$$P = P_{W1} + P_{W2} = \sqrt{3}\, U_л\, I_л \cos\varphi.$$

Метод трех приборов применяется для измерения активной мощности в трехфазной четырехпроводной цепи. Схема включения ваттметров показана на рис. 6.12. По этой же схеме производится включение трехэлементных трехфазных ваттметров.

Полная мощность равна сумме показаний всех ваттметров

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}.$$

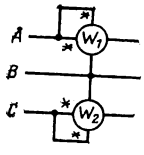


Рис. 6.11. Схема включения двух ваттметров для измерения активной мощности

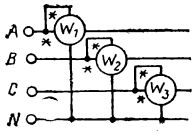


Рис. 6.12. Измерение активной мощности методом трех приборов

Измерение реактивной мощности

Реактивная мощность в однофазной цепи определяется выражением

$$Q = UI \sin\varphi.$$

В трехфазной цепи реактивная мощность определяется как сумма реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = U_A I_A \sin\varphi_A + U_B I_B \sin\varphi_B + U_C I_C \sin\varphi_C.$$

В случае полной симметрии цепи

$$Q = 3U_ф I_ф \sin\varphi = \sqrt{3}\, U_л I_л \sin\varphi.$$

Как следует из приведенных выражений, для измерения реактивной мощности в однофазной цепи требуется обеспечить вращающий момент ваттметра, пропорциональный не $\cos\varphi$, а $\sin\varphi$. Для этой цели применяются специальные схемы, обеспечивающие угол сдвига фазы между током и напряжением в параллельной обмотке, равный 90°. Однако задача измерения реактивной мощности в однофазных цепях встречается крайне редко. Поэтому промышленность специальных ваттметров для этой цели не выпускает. Измерить реактивную мощность в трехфазных сетях возможно ваттметрами активной мощности с несущественными изменениями. При этом ваттметры включаются в трехфазную цепь по схеме с замещенными напряжениями. Предполагается, что в трехфазных сетях выполняется условие симметрии напряжений. В противном случае результаты измерения реактивной мощности окажутся неверными.

Расширение пределов измерения реактивной мощности, так же как и в случае активной мощности, достигается посредством трансформаторов тока и напряжения.

Измерение реактивной мощности методом одного прибора

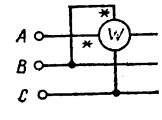
Схема включения прибора показана на рис. 6.13. Метод требует полной симметрии в цепи. Показание ваттметра равно

$$P_W = U_л I_л \sin\varphi.$$

Для получения реактивной мощности всей цепи показание ваттметра следует умножить на $\sqrt{3}$:

$$Q = \sqrt{3}\, P_W = \sqrt{3}\, U_л I_л \sin\varphi.$$

Рис. 6.13. Измерение реактивной мощности одним прибором



Данный метод весьма чувствителен к асимметрии токов в трехфазной цепи, которая приводит к значительным погрешностям.

Измерение реактивной мощности методом двух приборов

Схема включения приборов представлена на рис. 6.14. Метод измерения дает правильные результаты как при симметрии, так и при асимметрии токов. Параллельные обмотки ваттметров включаются по схеме с искусственной нулевой точкой, для создания которой используются сопротивления параллельных цепей ваттметров и дополнительный резистор.

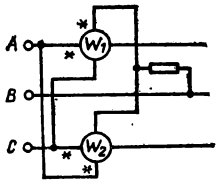


Рис. 6.14. Измерение реактивной мощности двумя приборами

Сумма показаний обоих ваттметров

$$P = P_{W1} + P_{W2} = \sqrt{3}\, U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi.$$

Для получения реактивной мощности всей цепи полученный результат следует умножить на $\sqrt{3}$:

$$Q = \sqrt{3}\, P = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi.$$

Показания ваттметра зависят от значения угла φ.

По этой же схеме включаются двухэлементные варметры, выпускаемые промышленностью для цепей измерения реактивной мощности в трехфазных трехпроводных цепях. Конструктивно варметры не отличаются от двухэлементных ваттметров, а умножение результата измерения на $\sqrt{3}$ учитывается при их градуировке.

Измерение реактивной мощности методом трех приборов

Схема включения приборов представлена на рис. 6.15. Метод применяется для измерения реактивной мощности в трехфазных четырехпроводных сетях и дает правильные результаты измерения как при симметрии, так и при асимметрии токов. Этот метод может с успехом использоваться и для измерения реактивной мощности в трехфазных трехпроводных цепях, в отличие от предыдущего метода он не требует создания искусственной нулевой точки.

В данном случае сумма показаний всех ваттметров

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} = 3 U_{л} I_{л} \sin \varphi.$$

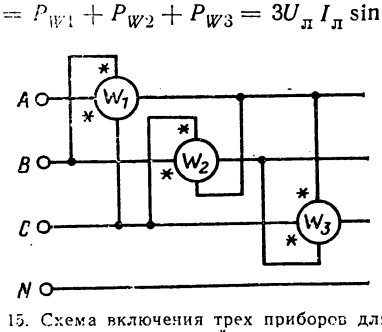


Рис. 6.15. Схема включения трех приборов для измерения реактивной мощности

Чтобы получить значение реактивной мощности трехфазной цепи, сумму показаний ваттметров следует разделить на $\sqrt{3}$:

$$Q = \frac{P}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}\, U_{л} I_{л} \sin \varphi = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi.$$

По этой же схеме включаются трехэлементные варметры, выпускаемые промышленностью для измерения реактивной мощности в трехфазных четырехпроводных цепях. Конструктивно варметр не отличается от трехэлементного ваттметра, а умножение результата измерения на $\sqrt{3}$ учитывается при градуировке варметра.

Измерение расхода электрической энергии

Измерение расхода активной и реактивной электрической энергии в цепях переменного тока для промышленных целей или бытовых нужд производится с помощью индукционных счетчиков переменного тока номинальной частотой 40—60 Гц (ГОСТ 6570-75).

Промышленностью выпускаются электрические счетчики переменного тока следующих типов: СО, СОУ, СА3, СА4, СР3, СР4, СР3У, СР4У.

В обозначениях типов счетчиков буквы и цифры означают: С — счетчик; А — активной энергии; Р — реактивной энергии; О — однофазный; 3 и 4 — для трех- или четырехпроводной сети; У — универсальный.

Счетчики активной энергии выпускаются классов точности 0,5; 1,0; 2,0; 2,5, счетчики реактивной энергии — классов 1,5; 2,0; 3.

У счетчиков должен отсутствовать самоход, т. е. диск счетчика не должен совершать более одного полного оборота при отсутствии тока в последовательной цепи и при напряжении в параллельной цепи 80—110 % номинального значения.

По чувствительности к счетчикам предъявляется требование — диск счетчика должен начать и продолжать непрерывно вращаться при номинальном напряжении, $\cos \varphi = 1$ ($\sin \varphi = 1$) и токе не более 0,4 % номинального — для счетчиков класса точности 0,5; 0,5 % номинального — для счетчиков классов точности 1,0; 1,5 и 2,5; 1% номинального — для счетчиков классов 2,5 и 3,0.

Генераторные зажимы токовых обмоток счетчиков обозначаются буквой Г, зажимы обмоток напряжения счетчиков, предназначенных для включения в трехфазные трех- и четырехпроводные сети, — цифрами 1, 2, 3 и 0.

Трансформаторные счетчики подключаются через трансформаторы тока и напряжения с определенным коэффициентом трансформации.

Универсальные счетчики подключаются через трансформаторы тока и напряжения с любыми коэффициентами трансформации, но определенными номинальными вторичным током и напряжением.

Схемы включения счетчиков как активной, так и реактивной энергии аналогичны схемам включения ваттметров активной и реактивной мощности соответственно.

6.4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерительные мосты постоянного и переменного тока

Мосты постоянного и переменного тока делятся на мосты с ручной наводкой на равновесие и цифровые мосты.

Мосты постоянного тока с ручной наводкой на равновесие. Мосты постоянного тока выпускаются 14 типов с различными назначением, пределами измерения, классами точности [6.4]

Мосты типов Р369, Р329, Р316, Р3009, Р4053, Р4060, МО-70, МОД-61, Р39 предназначены для измерения сопротивления электрической цепи на постоянном токе. Диапазон измеряемых сопротивлений (10^{-8}—10^{15} Ом) зависит от типа моста.

Мост типа КМ-61С предназначен для измерения параметров и определения мест повреждения линии связи.

Мост типа Р333 предназначен для измерения сопротивления по схеме одинарного моста, определения места повреждения кабеля посредством петли Варлея, Муррея, для измерения асимметрии проводов и для использования как магазина сопротивлений. Диапазон измеряемых сопротивлений от 0,005 до 999 900 Ом разбит на три предела измерения с классами точности 0,5; 1,0; 5,0. Габаритные размеры: 300×230×150 мм. Масса не более 5 кг. Цена 39 руб. 50 коп.

Мост одинарно-двойной Р3009 предназначен для измерения сопротивлений постоянному току в пределах от 10^{-8} до 10^{10} Ом. Установленные классы точности от 2 до 0,01. Измерение сопротивлений от 10^{-1} до 10^{8} в схеме одинарного моста производится по классу точности 0,01. Комплект моста состоит из трех блоков с габаритами 490×210×520; 440×210×210; 240×225×150 мм. Цена 940 руб.

Кабельный мост типа Р334 предназначен для измерения сопротивления на постоянном токе по схеме одинарного моста, определения места повреждения кабеля на постоянном токе, измерения асимметрии проводов, измерения сопротивления изоляции, определения места обрыва в кабеле измерением емкости и измерения емкости обмоток силовых трансформаторов и кабелей.

Мосты типа ММВ предназначены для измерения сопротивления проводников постоянному току.

Мосты реохордные типа Р38 предназначены для измерения сопротивления электролитов на переменном токе и сопротивления твердых проводников на постоянном токе.

Цифровые мосты и омметры постоянного тока. Цифровые мосты и омметры постоянного тока предназначены для измерения сопротивления электрической цепи и отклонения сопротивления от установленного наминального значения. Диапазон измеряемых сопротивлений 10^{-3}—10^{10} Ом, основная погрешность 0,02—1 %, время измерения 0,2—2 с.

Для измерения абсолютного значения сопротивления выпускаются мосты типов Щ34, Р380, Р383, Р382. Мост типа Р382 позволяет измерять и отклонение сопротивления от заданного номинального значения. Для измерения отклонения сопротивления от заданного значения выпускаются процентные мосты типов Щ30-04,1, Р337, Ф4206 и Ф4205.1. Для контроля допуска сопротивления резистора от номинала выпускается контроллер допусковый типа Ф4210.

Цифровой мост типа Щ34 предназначен для измерения сопротивлений в диапазоне 10^{-3}—10^{9} Ом; время измерения 1 с; выбор предела автоматический; габариты 500×400×200 мм; масса 15 кг. Основная погрешность моста зависит от предела измерения: 0,1+0,01 $R_к/R_x$ для поддиапазонов 10^{-3}—10^{3} Ом и 10^{5}—10^{7} Ом; 0,02+0,005 $R_к/R_x$ для поддиапазона 10^{3}—10^{5} Ом; 1,0+0,1 $R_к/R_x$ для поддиапазона 10^{7}—10^{9} Ом. Ориентировочная цена 1400 руб.

С характеристиками других мостов можно ознакомиться в [6.4].

Мосты переменного тока с ручной наводкой на равновесие. Мосты переменного тока типов Р571М, Р577, Р5026 предназначены для измерения емкости C, индуктивности L, тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ и добротности Q, типа Р595 — для измерения C и $\operatorname{tg}\delta$ при профилактике сетей высокого напряжения, типа Р525 — для измерения $\operatorname{tg}\delta$ и C твердых и жидких электроизоляционных материалов, типа Р568 — для измерения $\operatorname{tg}\delta$ и C при исследовании закономерностей электротермических и полимеризационных реакций различных органических соединений, типа Р5021 — для исследования электрохимических систем. С характеристиками мостов можно ознакомиться в § 6.4.

Цифровые мосты переменного тока. Предназначены для измерения емкости C, тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$, индуктивности L, сопротивления потерь $R_п$, активного сопротивления R и постоянной времени τ.

Цифровые мосты переменного тока выпускаются типов Р589, Р591, Р5010, с питанием от сети 220 В±10 %, 50 Гц±1 %.

Мост типа Р5010 предназначен для измерения C, $\operatorname{tg}\delta$, L, $R_п$, R и τ. Число знаков отсчета — четыре. Диапазон измеряемых емкостей от 0,1 пФ до 99,99 мкФ; $\operatorname{tg}\delta$ от 0 до 0,5; индуктивностей от 1 мкГн до 9,999 Гн; $R_п$ от 0 до 40,00 кОм (в зависимости от поддиапазона измерения); сопротивлений R от 100 мОм до 999,9 кОм. Диапазоны измеряемых величин разбиты на семь поддиапазонов. Погрешность измерения зависит от выбранного поддиапазона, ее минимальное значение 0,5 % для C, L, $R_п$ и R; $\pm(0{,}02\ \operatorname{tg}\delta+2\cdot10^{-3})$ для $\operatorname{tg}\delta$. Рабочая частота моста 1000 Гц. Время измерения не более 0,3 с. Габаритные размеры 540×480×220 мм; масса не более 20 кг. Цена 2275 руб.

Цифровые приборы для измерения напряжений и токов

Цифровые вольтметры переменного тока охватывают диапазон измеряемых напряжений от 1 мкВ до 1000 В, обладают малой погрешностью (0,01—0,1 %), большим входным сопротивлением (до 1000 МОм), высоким быстродействием (от 2 до 500 измерений в секунду), снабжены специальными фильтрами для подавления индустриальных помех и выходом на цифропечатающее или обрабатывающее результаты измерения устройство в коде 8—4—2—1

(исключение представляет Щ1513, код которого 2—4—2—1).

Диапазоны измеряемых напряжений разбиваются на ряд поддиапазонов. Выбор нужного поддиапазона обычно ручной, но в некоторых типах (Щ1516, В2-22) предусмотрен, помимо ручного, автоматический и дистанционный выбор поддиапазона измерения.

Полярность измеряемого напряжения всегда выбирается автоматически и указывается на отсчетном устройстве.

Большинство типов цифровых вольтметров, выпускаемых в настоящее время промышленностью, основано на методе двухтактного интегрирования. Метод двухтактного интегрирования — это метод преобразования измеряемого напряжения в код, в котором содержится два основных такта: на первом также интегрируется измеряемое напряжение в заданном интервале времени (обычно равном или кратном 20 мс), на втором такте измеряется значение напряжения интегрирующего устройства, полученное в первом такте. Выбор первого такта равным или кратным периоду сетевого напряжения промышленной частоты позволяет исключить действие помех с частотой 50 Гц на результат измерения. Однако из-за отклонений частоты сетевого напряжения от номинального значения полного подавления помехи промышленной частоты достичь не удается. Поэтому некоторые типы цифровых вольтметров имеют во входной цепи фильтры, настроенные на частоту 50 Гц, которые могут быть включены или выключены специальной кнопкой на лицевой панели прибора. Следует помнить, что фильтр из-за его инерционности резко снижает быстродействие прибора. Степень подавления помехи промышленной частоты является паспортной характеристикой переносных цифровых вольтметров и выражается коэффициентом подавления помехи в децибелах. Помимо указанных основных тактов преобразования в цифровых вольтметрах двухтактного интегрирования часто содержится третий такт (длительностью примерно 10 мс), предназначенный для периодической коррекции смещения нулевого уровня преобразователя. Поэтому полное время преобразования в код входного сигнала у вольтметров двухтактного интегрирования всегда более 20 мс и достигает десятых долей секунды.

Цифровой вольтметр типа Щ68002 двухтактного интегрирования предназначен для измерения постоянного напряжения в диапазоне 0—1000 В, разбитом на пределы 0—0,120000; 0—1,20000; 0—12,0000; 0—120,000; 0—1000 В. Класс точности на основных пределах измерения 0,03/0,05. Число знаков — 6. Входное сопротивление на двух первых пределах измерения 1000 МОм, на последующих — 10 МОм. Коэффициент подавления помехи общего вида: на постоянном токе — 130 дБ, на переменном токе промышленной частоты — 120 дБ. Коэффициент подавления помехи нормального вида промышленной частоты. 60 дБ. Габаритные размеры 480×118×120 мм.

Прибор цифровой типа Ф229, однопредельный, основан на методе двухтактного интегрирования и предназначен для измерения напряжений и токов в цепях постоянного тока, может быть использован для встраивания в измерительные устройства и установки, применяемые в различных областях промышленного производства. Прибор имеет семь модификаций, различающихся видом измеряемой величины, пределом измерения и входным сопротивлением: Ф229-1/1, Ф229-1/2,..., Ф229-1/7. Число 1 в числителе дроби означает, что прибор питается от промышленной сети частотой 50 Гц; числа в знаменателе означают вид измеряемой величины и предел измерения: первые цифры от 1 до 4 означают, что прибор — вольтметр с пределом измерения соответственно 0,2; 2; 20 и 200 В, входное сопротивление трех первых модификаций 40 МОм, четвертой — 1 МОм; цифры 5, 6, 7 означают, что прибор — миллиамперметр с пределами измерения соответственно 0,02; 0,2 и 2 мА, падение напряжения на входе у всех трех модификаций 1 мВ. Класс точности прибора 0,25/0,15; время преобразования 40 мс; число знаков отсчета — 4; потребляемая от источника питания мощность 3 В·А; габаритные размеры 60×120×150 мм; масса 0,6 кг.

Прибор цифровой типа Ф218, однопредельный, основан на методе двухтактного интегрирования, предназначен для измерения тока и постоянного напряжения и автоматической сигнализации о выходе измеряемой величины за допустимые пределы. Может быть использован в различных областях промышленного производства. Прибор снабжен дискриминатором, который сравнивает измеренное значение входной величины с двумя заданными в пределах диапазона измерения значениями (уставками). Отсчетное устройство индицирует значение и местоположение измеряемой величины относительно заданного поля допуска тремя символами «Много», «Норма» и «Мало». Прибор имеет изолированный вход, что повышает его помехозащищенность и позволяет производить измерения в незаземленных цепях. Прибор имеет 13 модификаций; различающихся видом измеряемой величины, пределом измерения, классом точности, входным сопротивлением: Ф218-1/1, Ф218-1/2,..., Ф219-1/13. Число 1 в числителе дроби означает, что прибор питается от сетевого напряжения промышленной частотой 50 Гц; числа в знаменателе означают вид измеряемой величины, предел измерения, класс точности: числа от 1 до 5 означают, что прибор — вольтметр с пределом измерения соответственно 0,1; 1; 10; 100 и 1000 В; класс точности первых четырех модификаций 0,1/0,06, пятой — 0,2/0,1; входное сопротивление каждой модификации равно соответственно 20, 200, 1, 10 МОм. Модификации 6, 7, 8, 9 представляют собой миллиамперметры с пределами измерения соответственно 0,1; 1; 10 и 100 мА; класс точности всех четырех модификаций 0,1/0,06. Число знаков отсчета — 4; время преобразования 120 мс; время непрерывной работы прибора без калибровки 500 ч; потребляемая от источника питания мощность 12,5 В·А; габаритные размеры 80×160×250 мм; масса 2,5 кг; ориентировочная цена 500 руб.

Вольтметр цифровой типа Ф219, однопредельный, предназначен для измерения действующих значений синусоидальных напряжений. Измеряемое напряжение в приборе выпрямляется, масштабируется и преобразуется в код методом двухтактного интегрирования. Вольтметр имеет девять модификаций, разли-

чающихся пределом измерения, классом точности, частотным диапазоном, входным сопротивлением: Ф219-1/1, Ф219-1/2,...,Ф219-1/9. Число 1 в числителе дроби означает, что прибор питается от промышленной сети с частотой 50 Гц; числа в знаменателе определяют предел измерения, класс точности, частотный диапазон и другие характеристики. Пределы измерения, соответствующие номеру модификации прибора в порядке возрастания: 0,2; 2; 20; 200; 0,5; 5; 50; 500; 1000. Класс точности и частотный диапазон измеряемых сигналов для первых семи модификаций 0,4/0,25 и 40—10 000 Гц, для модификаций 8 и 9 соответственно — 1,0/0,5 и 45—55 Гц. Входное сопротивление для модификаций 1, 4, 5, 8 и 9—1 МОм, для других модификаций — 0,5 МОм. Входная емкость 100 пФ; время преобразования 120 мс; число знаков отсчета — 4; время непрерывной работы прибора без калибровки 500 ч; потребляемая от источника питания мощность 10 В·А; габаритные размеры 80×160×250 мм; масса 2 кг; наработка на отказ 4500 ч; средний срок службы 6 лет. Ориентировочная цена 300 руб.

Цифровые вольтметры переменного тока типов Ф485, Ф486 предназначены для измерения действующего значения переменного напряжения синусоидальной и несинусоидальной формы кривой в звуковом диапазоне частот и различаются только классом точности — основная приведенная погрешность на всех поддиапазонах Ф485 не превышает ±0,2 % а Ф486 —±0,5 %. Остальные характеристики у обеих моделей совпадают.

Диапазон измерения 10 мВ — 1000 В разбит на пять пределов: 0,1; 1; 10; 100 и 1000 В. Диапазон рабочих частот для пределов 0,1; 1; 10 и 100 В от 45 до 20 000Г ц, для предела 1000 В — от 45 до 400 Гц. Допустимое значение отношения амплитуды к действующему значению для пределов 0,1; 1; 10 и 100 В не более 4. На пределе 1000 В вольтметры измеряют только синусоидальное напряжение. Входное сопротивление на пределах: 0,1 В — 10 МОм; 1 В — 100 кОм; 10 и 100 В — 1 МОм; 1000 В — 10 МОм. Входная емкость на всех пределах не более 100 пФ. Время измерения не более 6 с при ручном выборе пределов и не более 8 с — при автоматическом. Результат измерения может быть передан во внешние устройства в коде 8—4—2—1. Питание прибора от сети 220 В±10 %, 50±1 Гц. Габаритные размеры 480×470×136 мм; масса 20 кг.

Комбинированные цифровые приборы

Комбинированные цифровые приборы предназначены для измерения нескольких электрических величин. Результат измерения индицируется на цифровом отсчетном устройстве и выдается во внешние устройства кодом 8—4—2—1. Питание приборов типов Ф30 и Щ382 производится от сети напряжения 220 В±10 %, частоты 50±1 Гц, для приборов других типов допуск на напряжение сети расширен: ±10 %, —15 %.

Прибор комбинированный цифровой Щ300 предназначен для измерения постоянного, напряжения, постоянного тока и сопротивления постоянному току; может применяться в научно-исследовательских институтах, поверочных и ремонтных лабораториях, а также на промышленных предприятиях.

Пределы измерения: напряжения — 1, 10, 100 мВ, 1, 10, 100, 1000 В; тока — 100 нА, 1, 10, 100 мкА; 1, 10, 100 мА, 1 А; сопротивление — 100 Ом, 1, 10, 100 кОм, 1, 10, 100 МОм, 1 ГОм.

Классы точности: по напряжению 0,05/0,02 до 0,2/0,1; по току от 0,1/0,02 до 0,2/0,1; по сопротивлению от 0,1/0,02 до 2,0/0,5 в зависимости от предела измерения.

Ослабление помех: нормального вида 60 дБ; общего вида частоты питающей сети — не менее 80 дБ; общего вида, представляющей постоянное напряжение не менее 100 дБ.

Число знаков отсчета 5.

Питание прибора от сети переменного тока 220^{+22}_{-33} В, 50 Гц±1 Гц.

Габаритные размеры 110×317×317 мм. Масса не более 6 кг. ТУ 25-04, 3717-79. Цена 850—00 руб.

Универсальный прибор типа Ф4800 предназначен для измерения постоянных токов I и напряжений U, емкости C конденсаторов с твердым диэлектриком, индуктивности L катушек без магнитопроводов, сопротивления постоянному току R, средней частоты колебаний и следования импульсов f, процентного отклонения промышленной частоты от номинального значения Δf, интервала времени между двумя импульсами t, а также счета числа импульсов n.

Измеряемые параметры, диапазоны и пределы измерения, а также погрешности измерения представлены в табл. 6.6.

Пределы измерения I, U, C, L, R выбираются вручную, для остальных параметров устанавливаются автоматически.

Добротность катушек индуктивности Q и тангенс угла потерь конденсаторов $\operatorname{tg}\delta$ измеряются на частоте 50 Гц.

При измерений f, t и n входные импульсы должны иметь амплитуду от 1 до 60 В, длительность не менее 0,5 мкс и фронт не более 0,1 мкс. При измерении f синусоидальных колебаний действующее напряжение должно быть от 2 до 60 В.

Погрешность измерения процентного отклонения частоты ±10 % обеспечивается при входном напряжении +60 В.

Входное сопротивление: при измерении U 1 МОм, при измерении f, t и n 10 кОм.

Время измерения всех величин, кроме сопротивлений, не более 0,2 с; время измерения сопротивления не более 10 с.

Габаритные размеры 496×380×135 мм; масса 12 кг. Цена 3000 руб.

Вольтметры и амперметры типов Ф2000, Ф2001, Ф2002, Ф2003 предназначены для измерения постоянных токов и напряжений.

По виду измеряемой величины, диапазонам измерения и конструктивному исполнению приборы делятся на модификации. Однопредельные вольтметры типа Ф2000 имеют модификации Ф2000/1, Ф2000/2, Ф2000/3, Ф2000/4 и Ф2000/5 с диапазонами измерения соответственно 0,1; 1; 10; 100 и 1000 В; конструктивно выполнены в виде частичных вставных блоков АСЭТ.

Многопредельные вольтметры Ф2001 и Ф2002 имеют поддиапазоны измерения 0,1; 1;

Таблица 6.6. **Характеристики прибора типа Ф4800**

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Пределы измерения	Класс точности
Напряжение	0,001—1000 В	1; 10; 1000 В	0,35/0,1
Ток	0,1—1000 мА	1; 10; 100; 1000 мА	0,35/0,1 0,7/0,2
Емкость	10 нФ—100 мкФ при tg δ<0,02	1000 нФ; 1; 10 мкФ	0,35/0,1
	10—100 мкФ при tg δ<0,03	100 мкФ	0,7/0,2
	1 нФ — 10 мкФ при tg δ<0,02	0,1; 1; 10; 100 мкФ	0,35/0,1
Индуктивность	0,01—1 Гн	1; 10 Гн	0,45/0,2
Сопротивление	10 Ом — 1 МОм	0,1; 1; 10; 100; 1000 кОм	0,35/0,1
Частота	1 — 1000 кГц	10; 100; 1000 кГц	0,03/0,01
Интервал времени	1 мс — 1000 с	0,01; 0,1; 1; 10; 100 с	0,07/0,02
Отклонение частоты	−100÷+10 %	10 %	$\pm\left(0{,}1+\frac{\Delta f}{100}\right)$
Число импульсов	1 — 10^9	10^4; 10^5; 10^6; 10^7; 10^8; 10^9	±1 импульс

Таблица 6.7 **Габаритные размеры приборов**

Характеристика прибора	Прибор			
	миниатюрный	малого габарита	среднего габарита	большого габарита
Наибольший размер лицевой части, мм	50	50—100	100—200	Свыше 200
Габаритные размеры, мм	От 20×20×37 или 21×18×28 до 46×47×79	От 30,5×65,5×83 до 100×100×115	От 20×105×80 до 175×160×110	От 144×226×136 до 450×490×120

10; 100 и 1000 В. Переключение поддиапазонов ручное и дистанционное. Вольтметр Ф2001 конструктивно выполнен в виде частичного приборного блока АСЭТ, а Ф2002 — в виде частичного вставного блока АСЭТ.

Амперметры Ф2003 предназначены для измерения тока в пределах 0—7500 А, имеют модификации Ф2003/1 и Ф2003/2. Первая модификация комплектуется калиброванным шунтом на 60 мВ, вторая — на 75 мВ. Обе модификации выполнены в виде частичных вставных блоков АСЭТ.

Класс точности всех приборов 0,3/0,1. Входное сопротивление вольтметров на поддиапазоне 1 В не менее 6 МОм, на поддиапазоне 1 В — не менее 1 МОм, на остальных поддиапазонах 10 МОм. Время одного измерения 40 мс. Подавление помех нормального вида частотой 50 и 100 Гц не менее 60 дБ.

Габаритные размеры 101×237×315 мм; масса 6 кг. Цена 1500 рул.

Щитовые аналоговые приборы

Общие сведения. Щитовые приборы изготавливаются для измерения 18 электрических величин, применяются как в лабораторных и цеховых условиях, так и в широком диапазоне изменений внешних условий. Этим объясняется большое разнообразие конструкций приборов. Ниже приводятся общие сведения о щитовых аналоговых приборах. Более подробную информацию по данной группе приборов можно найти в [6.4].

В основу конструкции щитовых аналоговых приборов наиболее часто закладываются системы: магнитоэлектрическая, электромагнитная, ферродинамическая, индукционная, выпрямительная и термоэлектрическая.

В зависимости от расположения измерительного механизма по отношению к корпусу прибора и размеров лицевой части приборы делятся на группы (рис. 6.16).

Приборы с расположением измерительного механизма в центре одной из сторон и углом отклонения указателя более 100° (рис. 6.16, *а, б*) называют панорамными. Приборы с расположением измерительного механизма в углу (рис. 6.16, в) имеют угол отклонения указателя 90° и называются квадратными. Приборы с зашкальным расположением измерительного механизма, ось которого параллельна плоскости шкалы, и с отчетом по стрелке (рис. 6.16, *г*) называются профильными; с отчетом по свето-

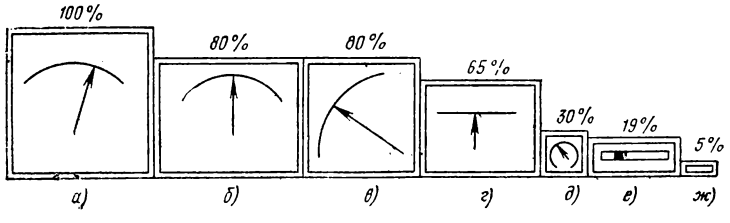


Рис. 6.16. Расположение измерительного механизма по отношению к лицевой части прибора

Таблица 6.8. **Предельные возможности измерения щитовыми приборами величин**

Измеряемая величина	Предел измерения	Единица величины	Прибор			
			миниатюрный	малого габарита	среднего габарита	большого габарита
Ток постоянный	Нижний	мкА	10	5	0,5	0,2
	Верхний:					
	прямое включение	А	10	20	50	20
	с наружным шунтом	кА	6,0	7,5	7,5	7,5
	с трансформатором постоянного тока	кА	—	—	150	70
	Класс точности	—	2,5	1,5	0,5	0,5
Ток переменный частотой 50 Гц	Нижний	мкА	—	25	25	5
	Верхний:					
	прямое включение с трансформатором тока	А	—	50	300	20
		кА	—	6	75	6
	Класс точности	—	—	1,5	1,0	1,5
Ток переменный	Нижний	мкА	$25 \cdot 10^6$	25	1500	$5 \cdot 10^6$
	Верхний:					
	прямое включение	А	—	50	200	20
	с трансформатором тока	кА	0,3	6	6	6
	Максимальная частота	Гц	1200	$75 \cdot 10^6$	$75 \cdot 10^6$	500
	Инфранизкая частота	Гц	—	—	0,25-1,5	—
	Класс точности	—	2,5	1,5	1,5	1,5
Отношение токов	Отношение	—	—	1,5	—	—
	Номинальные токи	А	—	1—1,5	—	—
	Основная погрешность	%	—	4	—	—
Напряжение постоянное	Нижний	мВ	45	10	0,5	0,5
	Верхний:					
	прямое включение	В	600	600	1500	500
	с добавочным резистором	кВ	3	20	20	—
	Класс точности	—	2,5	1,5	0,5	0,5
Напряжение переменное частотой 50 Гц	Нижний	В	30	0,5	0,5	30
	Верхний:					
	прямое включение	В	250	6000	3000	450
	с трансформатором напряжения	кВ	—	7,5	600	30
	Класс точности	—	1,5	1,0	1,0	1,5
Напряжение переменное	Нижний	В	45	0,5	0,5	30
	Верхний:					
	прямое включение	В	250	600	3000	450
	с трансформатором напряжения	кВ	—	7,5	450	—
	Максимальная частота	Гц	1,2	10	$2 \cdot 10^4$	10
	Инфранизкая частота	Гц	—	—	0,25—1,5	—
	Класс точности	—	2,0	1,0	1,0	1,5
Сопротивление изоляции	Нижний	МОм	—	1,0	1,0	—
	Верхний	МОм	—	5,0	20	—
	Класс точности	—	—	2,5	1,5	—
Мощность постоянного тока	Номинальный ток					
	Напряжение:	А	—	—	2000	—
	нижний	В	—	—	50	—
	верхний	В	—	—	1200	—
	Класс точности	—	—	—	2,5	—
Активная мощность однофазного тока*	Номинальный ток:					
	нижний	А	—	—	1	—
	верхний	А	—	—	5	—
	с трансформатором тока	кА	—	—	15	—
	Номинальное напряжение:					
	нижний	В	—	—	127	—
	верхний	В	—	—	220	—
	с трансформатором напряжения	кВ	—	—	380	—
	Класс точности	—	—	—	1,5	—
Активная мощность трехфазного тока трехпроводной сети	Номинальный ток:					
	нижний	А	—	1	1	—
	верхний	А	—	5	5	—
	с трансформатором тока	кА	—	4	40	—
	Номинальное напряжение:					
	нижний	В	—	127	127	—
	верхний	В	—	380	380	—
	с трансформатором напряжения	кВ	—	0,38	500	—
	Класс точности	—	—	2,5	1,5	—
Активная мощность трехфазного тока четырехпроводной сети	Номинальный ток:					
	нижний	А	—	—	1	—
	верхний	А	—	—	5	—
	с трансформатором тока	кА	—	—	15	—
	Номинальное напряжение:					
	нижний	В	—	—	220	—
	верхний	В	—	—	380	—
	Класс точности	—	—	—	2,5	—

* Выпускается ваттметр инфранизкой частоты среднего габарита.

Продолжение табл. 6.8

Измеряемая величина	Предел измерения	Единица величины	Прибор			
			миниатюрный	малого габарита	среднего габарита	большого габарита
Реактивная мощность трехфазного тока	Номинальный ток:					
	низший	А	—	—	1	—
	высший	А	—	—	5	—
	с трансформатором тока	кА	—	—	15	—
	Номинальное напряжение:					
	низший	В	—	—	127	—
	с трансформатором напряжения	кВ	—	—	500	—
	высший	В	—	—	380	—
	Класс точности	—	—	—	2,5	—
Коэффициент мощности	Нижний	—	—	—	0,5—1—0,5	—
	Верхний	—	—	0—1—0	0—1—0	—
	Класс точности	—	—	2,5	1,5	—
Частота переменного тока	Нижний	Гц	350—450	47—52	5—60	—
	Верхний	Гц	350—900	45—2600	45—550	—
	Класс точности	—	4,0	1,1	2,5	—
Количество электричества	Нижний	мКл	—	—	30	—
	Верхний	мКл	—	—	150	—
	Основная погрешность	%	—	—	5	—

вому пятну (рис. 6.16, *е*) — узкопрофильными; с подвижной шкалой, проектируемой на небольшой экран (рис. 6.16, *ж*) — проекционными. Приборы с центральным расположением измерительного механизма и углом отклонения указателя более 230° (рис. 6.16, *д*) называют круглошкальными.

В зависимости от размеров лицевой части приборы делятся на миниатюрные, а также малого, среднего и большого габаритов (табл. 6.7).

Предельные возможности измерения щитовыми приборами различных величин представлены в табл. 6.8 (прочерки указывают на отсутствие приборов для измерения данной величины) [6.4]. Указанная в таблице точность является предельной для данного габаритного размера прибора.

При выборе размеров прибора руководствуются удобством и точностью отсчета. Последняя определяется минимальным перемещением указателя (стрелки), которое можно уверенно заметить глазом. Необходимо, чтобы это перемещение было в 3—4 раза меньше абсолютного значения допустимой погрешности. Заметное глазом отклонение указателя определяется углом зрения. Последний должен быть не менее 2′. Исходя от заданного расстояния до шкалы, можно определить минимальное заметное для глаза отклонение, затем, увеличив его в 3—4 раза, получить абсолютное значение основной погрешности. Таким образом следует выбирать класс прибора, длину его шкалы и габариты.

На практике измерительные задачи наиболее часто решаются с помощью приборов малого и среднего габаритов. Ниже приводятся характеристики некоторых типов таких приборов. С характеристиками приборов других типов можно ознакомиться в [6.4].

Приборы малого габарита. Микроамперметры *типа М2003* магнитоэлектрической системы предназначены для измерения постоянного тока. Характеристики приборов представлены в табл. 6.9.

Милливольтметры типов М4211 и М4212 магнитоэлектрической системы предназначены

Таблица 6.9. **Характеристики приборов типа М2003 с классами точности 1,5 и 2,5**

Рабочий диапазон измерения мкА	Внутреннее сопротивление, Ом, не более	Рабочий диапазон измерения, мкА	Внутреннее сопротивление, Ом не, более
0—50	3000	25—0—25	3000*
0—100	900	50—0—50	3000
0—200	900	100—0—100	900
0—300	500	200—0—200	900
0—500	500	300—0—300	500
0—1000	500	500—0—500	500
		1000—0—1000	500

* Только при классе точности 1,5.

для измерения постоянного напряжения. Пределы измерения М4211: 45, 75, 150, 300, 600, 750 и 1000 мВ; М4212 с симметричной двусторонней шкалой: 25—0—25 (0—25), 45—0—45 (0—45), 75—0—75 (0—75), 150—0—150 (0—150), 300—0—300 (0—300), 500—0—500 (0—500), 750—0—750 (0—750), 1000—0—1000 (0—1000) мВ. Ток, соответствующий конечному значению шкалы, 3 мА. Включение приборов производится калиброванными проводниками. Классы точности: 1,5 для М4211; 2,5 и 4,0 для М4212. Время успокоения подвижной части 4 с. Рабочие положения — вертикальное и горизонтальное. Габаритные размеры прибора М4211 60×60×46 мм, масса 0,15 кг; прибора М4212 40×40×50 мм, масса 0,125 кг. Ориентировочная цена М4211—5 р. 50 к., М4212—5 р. 80 к.

Миллиамперметры, амперметры, килоамперметры, вольтметры, киловольтметры типа М2001 магнитоэлектрической системы предназначены для измерения постоянных токов и напряжений. Класс точности приборов 2,5. Время успокоения подвижной части не более 4 с. Рабочее положение — горизонтальное и вертикальное. Габаритные размеры прибора 60×60×68 мм, а вольтметра с пределами измерения от 1,5 до 450 В 60×60×70 мм. Габаритные размеры добавочных сопротивлений и

шунтов типа Р105 25,5×29,5×31 мм, масса 0,02 кг; добавочного сопротивления типа Р103 210×80×94 мм, масса 0,65 кг; добавочного сопротивления типа Р102 110×80×94 мм, масса 0,23 кг. Цена 4 руб.

Вольтметры типа М2001 имеют конечные значения шкалы при непосредственном включении: 1,5; 3; 6,5; 15; 30; 50; 75; 150; 250 и 300 В; при включении с добавочным резистором на 1 мА: 600; 1000; 1500; 3000 В при его сопротивлениях 0,6; 1,0; 1,5 и 3,0 МОм соответственно. На те же конечные значения выпускаются вольтметры с симметричной двусторонней шкалой.

Амперметры типа М2001 выпускаются при непосредственном включении на токи 1; 5; 10; 30; 50; 100; 150; 300; 500 мА и 1; 3; 10 А. При этом падение напряжения на приборах 50 мА и выше не более 90 мВ. С шунтами на 75 мВ приборы имеют конечные значения 20; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 500; 750 А и 1; 1,5; 4; 6 и 7,5 кА. При этом приборы имеют падение напряжения 75 мВ при токе, соответствующем конечному значению. На те же конечные значения выпускаются амперметры с симметричной двусторонней шкалой.

Приборы типов Э140 и Э140/1 электромагнитной системы предназначены для измерения переменных токов и напряжений в диапазоне температур —40±+60 °С и относительной влажности до 98 % (при 60 °С), тряско-виброударопрочные. Пределы измерения и рабочая область частот приборов приведены в табл. 6.10. Классы точности: 2,5 для Э140; 1,5 для Э140/1.

Время успокоения не более 3 с. В приборах типа Э140 шкала практически равномерная в пределах 25—100 % конечного значения; типа Э140/1 — диапазон измерений от 65 до 100 % конечного значения растянут на 75 % длины шкалы. Отклонение температуры на каждые 10 °С приводит к изменению показаний не более чем на ±0,5 % для амперметров ±0,8 % для вольтметров типа Э140/1 и ±1 % для приборов типа Э140. Изменение частоты на ±10 % номинальной приводит к изменению показаний до ±1 % для амперметров и не превышает основной погрешности для вольтметров; внешние магнитные поля $5 \cdot 10^{-4}$ Тл приводят к изменению показаний не более чем

Таблица 6.10. **Пределы измерения и рабочая область частот приборов Э140, Э140/1**

Тип прибора	Предел измерения	Частота, Гц	Включение прибора
Э 140	100, 200, 300, 500мА; 1, 2, 3, 5, 10, 20 30, 50 А	50—500	Непосредственное
	5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 600, 750 А, 1; 1,5; 2, 3, 4, 5, 6 кА	50	Через трансформатор тока на 5 А
	10, 20, 30, 50, 75 100, 150, 200 А	400—500	Через трансформатор тока на 1 А
	15, 30, 500, 150, 250, 450 В	50; 400—500	Непосредственное
Э 140/1	140, 250, 450 А	50; 400; 500	Непосредственное

Таблица 6.11. **Характеристики киловаттметра типа Д8003**

Диапазон измерения, кВт	Ток при номинальном напряжении, В		Диапазон измерения, кВт	Ток при номинальном напряжении, В	
	220	380		220	380
2—0—6	20/5	10/5	20—0—80	300/5	150/5
2—0—8	30/5	15/5	25—0—100	300/5	200/5
4—0—12	40/5	20/5	40—0—120	400/5	200/5
5—0—15	50/5	30/5	50—0—150	—	300/5
10—0—30	100/5	50/5	100—0—300	1000/5	600/5
10—0—40	150/5	75/5	100—0—400	1500/5	750/5
20—0—60	200/5	100/5	200—0—600	2000/5	1000/5

на ±2,5 %; отклонение прибора на 45° от вертикального положения изменяет показание не более чем на 1 % длины диапазона измерений. Габаритные размеры приборов 85×85×80 мм; масса 0,55 кг. Цена Э140—3 руб., Э140/1— 10 руб.

Киловаттметры типа Д8003 предназначены для измерения активной мощности в трехфазных трехпроводных сетях частотой 50 Гц с равномерной и неравномерной нагрузкой фаз, в диапазоне температур от —50 до +60 °С и относительной влажности до 95 % (при 35 °С), тряскопрочные, вибростойкие. Класс точности 2,5. Конечные значения диапазонов измерения представлены в табл. 6.11.

Последовательные цепи ваттметра включаются в сеть через трансформаторы тока, параллельные — через добавочные резисторы типа Р84. Потребляемая мощность последовательной цепи прибора 3 В·А, параллельной 4 В·А. Время успокоения подвижной части 4 с. Отклонение окружающей температуры от нормальной (в пределах рабочих температур) на каждые 10 °С приводит к изменению показаний прибора не более чем на ±1,2 %. Внешнее магнитное поле с индукцией $5 \cdot 10^{-4}$ Тл, а также изменение частоты на ±10 % и напряжения на ±20 % номинального значения вызывает изменение показаний прибора не более чем на ±2,5 %. Габаритные размеры ваттметра 80×80×70 мм, добавочного сопротивления 110×80×50 мм; масса ваттметра с добавочным сопротивлением не более 0,6 кг. Цена 13 р. 50 к.

Приборы среднего габарита. *Микроамперметры и вольтметры типа М900* магнитоэлектрической системы предназначены для измерения постоянных токов и напряжений при окружающей температуре от —30 до +40 °С, относительной влажности до 90 % (при 30 °С), по стойкости к механическим воздействиям — обыкновенные с повышенной механической прочностью. Основные характеристики приборов представлены в табл. 6.12. Ориентировочная стоимость 15 р. 80 к.

Ток потребления милливольтметров 1 мА. Габаритные размеры 120×105×64 мм.

Рабочее положение приборов — вертикальное и горизонтальное. Время успокоения не превышает 4 с, для микроамперметров это время выдерживается при сопротивлении внешней цепи не ниже указанных в таблице значений.

Отклонение окружающей температуры от нормальной (в пределах рабочих температур) на каждые 10°С приводит к изменению пока-

Таблица 6.12. **Характеристика приборов типа М900**

Микроамперметры, милливольтметры		Микроамперметры	Милливольтметры
Диапазон измерения, мкА, мВ	Класс точности	Внутреннее сопротивление, Ом	Сопротивление внешней цепи, Ом, не менее
0—10	1,0; 1,5	5000	12,5
0—15		5000	4,5
0—20		5000	4
0—25		800	4
5—0—5	1,5	5000	12,5
10—0—10		500	4

заний не более чем на ±0,9 % для приборов класса 1,0 и ±1,2 % для прибора класса 1,5. Внешнее магнитное поле с индукцией $5 \cdot 10^{-4}$ Тл вызывает изменение показаний приборов не более ±1 %.

Приборы типа М366 магнитоэлектрической системы предназначены для измерения постоянных токов и напряжений, применяются в диапазоне температур от 10 до 40 °С и относительной влажности до 80 % (при 30 °С). Основные параметры приборов указаны в табл. 6.13. Класс точности 1,0. Время успокоения подвижной части вольтметров и милливольтметров 1 с, киловольтметров, амперметров и микроамперметров — 2 с. Рабочее положение — вертикальное. Отклонение окружающей температуры от нормальной 20±5 °С (в пределах рабочих температур) на каждые 10 °С приводит к изменению показаний не более чем на ±1 %. Внешнее магнитное поле с индукцией $5 \cdot 10^{-4}$ Тл при установке прибора на стальном щите толщиной 3 мм вызывает изменение показаний прибора не более чем на ±0,5 % конечного значения диапазона измерения. Габаритные размеры прибора 160×160×105 мм, масса 2 кг. Цена 12 р. 64 к.

Приборы типов Э377 и Э378 электромагнитной системы предназначены для измерения переменного тока и напряжения частотой 50, 60, 200, 500 и 1000 Гц, применяются в диапазоне от —40 до +50 °С и относительной влажности до 98% (при 35 °С), вибро- и тряскопрочные, пыле- и брызгозащищенного исполнения.

Амперметры типа Э377 класса точности 1,0 для частоты 50 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерения: 1,5; 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 500 мА; 1, 2, 3, 5, 10 20 А.

Многопредельные амперметры типа Э377 класса точности 1,0 для частоты 50 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерения 3—7; 5—15; 15—30—75—150; 300—750—15 000 мА; 1,5—3—7,5—15 А.

Амперметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 50 или 60 Гц, включаемые непосредственно, имеют пределы измерения 1,5; 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 250, 500, 750 мА; 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300 А; включаемые через трансформатор тока (вторичный ток 1 или 5 А), имеют пределы измерения 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 750, 800 А; 1; 1,5; 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15 кА.

Амперметры перегрузочные типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частот 50 и 60 Гц, включаемые непосредственно, имеют диапазоны измерения (в скобках предел на перегрузочной части шкалы) в амперах: 0,2—1 (6); 0,6—3 (20); 1—5 (30); 2—10 (60); 4—20 (100); 3—15 (80); 6—30 (200) 10—50 (300); включаемые через трансформатор тока (вторичный ток 1 или 5 А): 1—5 (30); 2—20(60); 3—15 (80); 4—20 (100); 6—30 (200); 8—40 (250); 10—50 (300); 17—75 (400); 20—100 (600) 30—150 (800); 40—200 (1000); 60—300 (2000); 80—400 (2500); 120—600 (3000); 150—800 (4000); 200—1000 (6000); 300—1500 (8000); 600—3000 (20 000) А; 0,8—4 (25); 1—5 (30); 1,2—6 (30); 1,5—8 (40); 2—10 (60); 3—15 (90); 5—25 (150) кА. В области перегрузок основная погрешность не более ±6% разности конечных значений перегрузочной шкалы и диапазона измерений.

Амперметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 200 Гц включаются непосредственно и имеют предел измерения 50 А.

Таблица 6.13. **Параметры приборов типа М366**

Наименование прибора	Диапазон измерения	Включение прибора	Падение напряжения, мВ, не более	Ток потребления, мА, не более
Микроамперметр	0—72—150—300—750 мкА	Непосредственное	20	—
Миллиамперметр	0—1,5—3—7,5—15 мА		200	—
	0—15—30—75—150 мА		150	—
	0—75—150—300—750 мА		100	—
Амперметр	0—1,5—3—7,5—15 А		100	—
Вольтметр	0—1,5—3—7,5—15; 0—30—75—150—300; 0—150—300—600—750; 0—1000 В		—	
Киловольтметры	0—1,5; 0—3; 0—4,5 кВ	С добавочными резисторами	—	3

Амперметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 500 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерений 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300 А.

Амперметры типа Э377 класса точности 1,5 для частоты 1000 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерений 100, 600 мА; 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100 А.

Вольтметры типа Э377 класса точности 1,5 для частоты 50 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерений 1; 1,5; 3; 7,5; 15, 30, 150, 250, 500, 600 В.

Вольтметры номинального напряжения типа Э377 класса точности 1,5 для частоты 50 Гц включаются непосредственно и имеют номинальное значение напряжения (в скобках диапазон измерений): 36 (30—40); 100 (90—120); 127 (110—150); 220 (180—250); 380 (320—420) В.

Вольтметры многопредельные типа Э377 класса точности 1,5 для частоты 50 Гц включаются непосредственно и имеют диапазоны измерений 7,5—15; 75—150; 30—300; 150—300—600 В.

Вольтметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 50 или 60 Гц, включаемые непосредственно, имеют пределы измерений 0,5; 1; 1,5; 3, 15, 30, 50, 75, 100, 250, 500, 600 В; включаемые через трансформатор напряжения (вторичное напряжение 100 В), имеют пределы измерений 450, 600, 750 В; 3; 5; 7,5; 12,5; 15; 17,5; 20, 35, 40, 125, 250, 400, 600 кВ.

Вольтметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 200 Гц включаются непосредственно и имеют предел измерения 250 В.

Вольтметры типов Э377 и Э378 класса точности 1,5 для частоты 500 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерений 15, 30, 50, 150, 250, 500, 600 В.

Вольтметры типа Э377 класса точности 1,5 для частоты 1000 Гц включаются непосредственно и имеют пределы измерений 10, 15, 30, 50, 150, 250, 500, 600 В.

Время успокоения подвижной части 4 с. Рабочее положение приборов — вертикальное. Отклонение окружающей температуры от нормальной 20 °С (в рабочем диапазоне температур) на каждые 10 °С приводит к изменению показаний до ±0,5 % для приборов типа Э377 класса 1,0 и ±0,8 % для класса 1,5. Внешнее магнитное поле с индукцией $5 \cdot 10^{-4}$ Тл вызывает изменение показаний приборов до ±2,5 % отклонение приборов от вертикального положения на 45° в любом направлении — до ±1 % для приборов класса 1,0 и до ±1,5 % — для класса 1,5; отклонение частоты от номинальной на ±10 % — до ±1 % для приборов класса 1,0 и ±1,5 % — для класса 1,5.

Габаритные размеры прибора типа Э377 120×120×116 мм, масса 1 кг; прибора типа Э378 160×160×125 мм; масса 1 кг. Ориентировочная стоимость Э377 — 4 р. 30 к.; Э378— 4 р. 57 к.

Ваттметры однофазные типа Д307 предназначены для измерения мощности в однофазных цепях переменного тока частотой 50 Гц, применяются для комплектовки щитов электростанций и пультов управления, работают в диапазоне температур от —40 до +50 °С и относительной влажности до 96 % (при 35 °С), вибро- и тряскопрочные, в пыле- и брызгозащищенном корпусе. Класс точности 1,5. Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi=1$. Приборы включаются непосредственно или через трансформаторы тока и напряжения. При непосредственном включении — напряжения 127, 220 и 380 В; при включении через трансформаторы номинальные напряжения от 380 до $5 \cdot 10^5$ В; номинальные токи от 5 до 15 000 А. Конечные значения шкалы от 0,6 до 800 кВт; от 1 до 800 МВт, от 1 до 8 ГВт. Время успокоения подвижной части 4 с. Рабочее положение — вертикальное. Шкала равномерная. Изменение показаний, вызванное отклонением окружающей температуры от номинальной 20±5 °С (в пределах рабочих температур), на каждые 10 °С не превышает ±0,8 %; вызванное действием внешнего магнитного поля напряженностью 400 А/м — не более ±2,5 %; вызванное отклонением на 45° от вертикального положения в любом направлении, изменением частоты на ±10 % и напряжения на ±20 % — не более ±1,5 %. Габаритные размеры 160×160×75 мм, масса 1,2 кг. Цена 15 руб.

Ваттметры и варметры типов Д335 и Д335/1 ферродинамической системы предназначены для измерения активной и реактивной мощности в трехфазных трехпроводных цепях переменного тока частотой 50 Гц. Рабочий диапазон температур от —40 до +50 °С, относительная влажность до 95 % (при 35 °С), тряско- и вибропрочные. Номинальный коэффициент мощности для ваттметров $\cos\varphi=1$, для варметров $\sin\varphi=1$. Класс точности 1,5. Включаются непосредственно или через трансформаторы. При непосредственном включении — напряжения 127, 220 и 380 В; при включении через трансформатор с выходным напряжением на 100 или 127 В диапазон номинальных напряжений расширяется от 380 до $5 \cdot 10^5$ В. Номинальный ток от 5 до 15 000 А. Шкала равномерная. Подвижная часть на растяжках. Изменение показаний вследствие отклонения окружающей температуры и действия внешнего магнитного поля аналогично ваттметру Д307 (см. выше), при установке прибора на ферромагнитном щите толщиной 3 мм — не превышает ±1 %, при изменении порядка следования фаз по сравнению с обозначенным на приборе — не превышает ±1,5 %. Габаритные размеры прибора типа Д335 120×120×96 мм, прибора типа Д335/1 160×160×113 мм, масса приборов 1,2 кг. Цена 18 р. 60 к.

	кВт (квар)	МВт	ГВт (Гвар)
Конечное значение прибора:			
с нулем слева	1—800	4—800	1—2—12
с нулем посредине	От 1—0—1 до 800—0—800	От 4—0—4 до 800—0—800	От 1,2—0—1,2 до 12—0—12

Ваттметры трехфазные четырехпроводные типа Ф323 ферродинамической системы предназначены для измерения активной мощности в трехфазных четырехпроводных цепях переменного тока частотой 50 Гц с равномерной и неравномерной нагрузкой фаз, применяются для комплектовки щитов электростанций и пультов управления. Рабочий диапазон темпе-

ратур от —40 до +50 °С, относительная влажность до 96 % (при 35 °С), тряско- и вибропрочные. Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi=1$. Класс точности 2,5. Рабочее положение — вертикальное. Номинальные напряжения и токи при непосредственном включении: 220 и 38 В; 5, 10, 15, 20, 30 и 40 А. С помощью измерительных трансформаторов тока номинальный ток расширяется до 15 000 А. Изменение показаний вследствие отклонения окружающей температуры от 20±5 °С (в диапазоне рабочих температур) не превышает ±1,2 % на каждые 10 °С; под действием внешнего магнитного поля с индукцией $5\cdot10^{-4}$ Тл (напряженностью 400 А/м) — не более ±5 %, при установке прибора на ферромагнитном щите толщиной 3 мм — не превышает ±1 %, при отклонении прибора от вертикального положения на 45° в любом направлении, а также под влиянием неравномерной нагрузки фаз — не превышает ±2,5 %. Габаритные размеры 160×160×74,5 мм, масса 1,2 кг. Ориентировочная стоимость 20 р. 70 к.

Фазометры типов Д362, Д363 и Д364 ферродинамической системы (логометры) предназначены для измерения коэффициента мощности $\cos\varphi$ в двухпроводных (однофазных) цепях (Д364) и трехфазных цепях (Д363, Д363) переменного тока частотой 50 Гц при равномерной нагрузке фаз и симметрии линейных напряжений. Рабочий диапазон температур от —40 до +50 °С, относительная влажность до 95 % (при 35 °С), тряско- и вибропрочные. Диапазон измерения в значениях $\cos\varphi$ приборов типов Д362 и Д363 0,1—1—0,5 или 0,9—1—0,2, класс точности 1,5; приборов типа Д364—0,5—1—0,5, класс точности 2,5. При непосредственном включении приборов — номинальный ток 5 А, номинальные напряжения 127, 220 и 380 В. Пределы измерения токов и напряжений могут быть расширены посредством трансформаторов тока с выходным током 5 или 1 А и напряжения с выходным напряжением 100 В. Фазометры с диапазоном измерения 0,9—1—0,2 предназначены только для непосредственного включения на номинальные напряжения 127 и 220 В. Время успокоения подвижной части 4 с. Нормальное положение — вертикальное. Изменение показаний вследствие отклонения окружающей температуры от нормальной (в пределах рабочих температур) на каждые 10 °С не превышает ±0,8 % для приборов типов Д362 и Д363 и ±1,2 % для прибора типа Д364; под действием внешнего магнитного поля с индукцией $5\cdot10^{-4}$ Тл — не более ±2,5 % для приборов типов Д362 и Д363 и ± 5% для приборов типа Д364. Габаритные размеры прибора типов Д363 120×120×108 мм, масса 0,7 кг; приборов типов Д363 и Д364 160×160×82 мм, масса прибора Д363 0,9 кг, прибора Д364 1 кг. Цена 25 руб.

Частотомеры типов Э371 и Э372 электромагнитной системы (логометры) предназначены для измерения частоты в цепях переменного тока. Рабочий диапазон температур от —40 до +50 °С, относительная влажность до 95 % (при 35 °С), тряско- и вибропрочные. Класс точности 2,5. Рабочее положение—вертикальное. Шкала безнулевая равномерная. Характеристики частотомеров представлены в табл. 6.14. Потребляемая мощность приборов, включенных через трансформаторы, 0,7—3 В·А. Время успокоения подвижной части 4 с. Изменение показаний вследствие отклонения окружающей температуры от нормальной 20± ±5 °С (в пределах рабочих температур) на каждые 10 °С не превышает ±1,2 %; под действием внешнего магнитного поля с индукцией $5\cdot10^{-4}$ Тл — не более ±5 %; при отклонении прибора от вертикального положения на 45° в любом направлении — не более ±2,5 %. Габаритные размеры прибора типа Э371 160×160×91 мм, масса 1,8 кг; прибора типа Э372 120×120×89 мм, масса 1,2 кг. Цена 5 руб.

Таблица 6.14. **Характеристики частотомеров Э371 и Э372**

Предел измерения, Гц	Номинальное напряжение, В	Включение прибора
45—55, 450—550	127, 220, 380	Непосредственное
45—55	100	Через трансформатор напряжения
180—220	220	Непосредственное

6.5. ОСНОВНАЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ В ОБЛАСТИ МЕТРОЛОГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Основополагающие стандарты в области метрологического обеспечения

ГОСТ 1.25-76. Государственная система стандартизации. Метрологическое обеспечение. Основные положения.

ГОСТ 8.001-80 (СТ СЭВ 1708-79). Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений.

ГОСТ 8.002-71 ГСИ. Организация и порядок проведения поверки, ревизии и экспертизы средств измерений.

ГОСТ 8.009-82 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

ГОСТ 8.010-72 ГСИ. Общие требования к стандартизации и аттестации методик выполнения измерений.

ГОСТ 8.011-72 ГСИ. Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений.

ГОСТ 8.042-72 ГСИ. Требования к построению, содержанию и изложению стандартов методов и средств поверки мер и измерительных приборов.

ГОСТ 8.054-73 ГСИ. Метрологическое обеспечение подготовки производства. Общие положения.

ГОСТ 8.057-80 ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения.

ГОСТ 8.061-80 ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение.

ГОСТ 8.103-73 ГСИ. Организация и порядок проведения метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации.

ГОСТ 8.207-76 ГСИ. Прямые измерения с многократным наблюдением. Методы обработ-

ки результатов наблюдений. Основные положения.

ГОСТ 8.251-77 ГСИ. Анализаторы статистических характеристик. Нормируемые метрологические характеристики.

ГОСТ 8.256-77 ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения.

ГОСТ 8.301-78 ГСИ. Государственная служба стандартных справочных данных. Основные положения.

ГОСТ 8.315-78 ГСИ. Стандартные образцы. Основные положения.

ГОСТ 8.316-78 ГСИ. Аттестация и утверждение государственных стандартных образцов.

ГОСТ 8.326-78 ГСИ. Метрологическое обеспечение разработки, изготовления и эксплуатации нестандартных средств измерений. Основные положения.

ГОСТ 8.344-79 ГСИ. Государственная служба стандартных справочных данных. Порядок аттестации данных о физических константах и свойствах веществ и материалов.

ГОСТ 8.372-80 ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Порядок разработки, утверждения, регистрации, хранения и применения.

ГОСТ 8.375-80 ГСИ. Нормативно-технические документы по методам и средствам поверки. Классификация, требования к выбору и разработке.

ГОСТ 8.381-80 (СТ СЭВ 403-76) ГСИ. Способы выражения погрешностей.

ГОСТ 8.382-80 ГСИ. Средства измерений образцовые. Общие требования к созданию, порядку метрологической аттестации и применению.

ГОСТ 8.383-80 ГСИ. Государственные испытания средств измерений. Основные положения.

ГОСТ 8.384-80 ГСИ. Организация и порядок проведения метрологической экспертизы технических заданий на разработку средств измерений.

ГОСТ 8.395-80 ГСИ. Нормативные условия измерений при поверке. Общие требования.

ГОСТ 8.401-80 ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.

ГОСТ 8.417-81 (СТ СЭВ 1058-81) ГСИ. Единицы физических величин.

ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения.

Методические указания

8.1-71 Общие методические указания по внедрению в народное хозяйство ГОСТ 8.001-71.

8.2-71 Методические указания о порядке оформления и рассмотрения материалов по результатам государственных испытаний средств измерений.

8.3-73 Методические указания по проведению метрологической экспертизы технических заданий на разработку средств измерений.

8.4-73 Методические указания об организации государственных комиссий по государственным приемочным испытаниям средств измерений.

8.5-74 Методические указания по разработке и утверждению типовых программ государственных приемочных испытаний средств измерений.

РДМУ 90-77 Методические указания о порядке планирования деятельности ведомственных метрологических служб.

РДМУ 101-77 Методические указания по разработке, согласованию и утверждению программ метрологического обеспечения отраслей народного хозяйства.

Некоторые стандарты на средства измерений электрических величин

ГОСТ 22261-76. Средства измерений электрических величин. Общие технические условия.

ГОСТ 8711-78. Амперметры и вольтметры. Общие технические условия.

ГОСТ 23217-78. Приборы электроизмерительные аналоговые с непосредственным отсчетом. Наносимые условные обозначения.

ГОСТ 6570-75 (СТ СЭВ 1108-78). Счетчики электрические активной и реактивной энергии индукционные.

ГОСТ 7590-78(СТ СЭВ 788-77). Приборы электроизмерительные для измерения частоты аналоговые показывающие.

ГОСТ 8042-78. Преобразователи измерительные, электрические величины. Шунты измерительные.

ГОСТ 8476-78 (СТ СЭВ 788-77). Ваттметры и варметры.

ГОСТ 8623-78. Сопротивления добавочные для электроизмерительных приборов.

ГОСТ 11013-81. Гальванометры осциллографические магнитоэлектрические.

ГОСТ 11282-75 (СТ СЭВ 2417-80). Делители напряжения постоянного тока измерительные.

ГОСТ 11921-78. Компенсаторы переменного тока.

6.6. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Магнитные измерения составляют неотъемлемую часть всей электроизмерительной техники. При этом доля магнитных измерений среди других непреывно возрастает. Объясняется это все более широким использованием магнитных явлений в науке и технике, значительным ростом выпуска ферромагнитных материалов (ФММ) и применением их в электротехнических устройствах, приборах и автоматике.

В основе классификации методов магнитных измерений лежит физическая сущность явлений, используемых для измерительного процесса — преобразования магнитной величины в электрический сигнал.

В связи с этим различают индукционные методы измерения магнитных величин; методы, основанные на взаимодействии двух магнитных полей; методы, основанные на влиянии магнитного поля на физические свойства вещества. На рис. 6.17 представлена классификационная схема наиболее распространенных методов измерения магнитного потока Ф, индукции B и напряженности магнитного поля H.

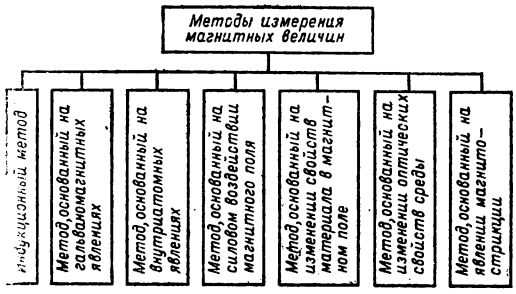


Рис. 6.17. Классификация методов измерения магнитных величин

Рис. 6.18. К принципу действия индукционного преобразователя

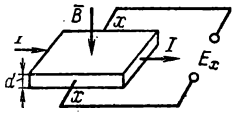


Рис. 6.19. К принципу действия гальваномагнитного преобразователя

Сущность индукционного метода измерения заключается в возникновении ЭДС в витках провода при изменении сцепляющегося с ними магнитного потока Ф (рис. 6.18). ЭДС e связана с потокосцеплением Ψ соотношением.

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -w\frac{d\Phi}{dt},$$

где w — число витков катушки.

Если магнитное поле однородное, то магнитный поток находится из выражения

$$\Phi = \int \frac{1}{w} e\,dt = BS,$$

где S — площадь сечения катушки.

В воздушной среде B связана с H соотношением

$$B = \mu_0 H,$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

Следовательно, индукционный метод измерения позволяет определить магнитный поток, индукцию и напряженность поля

$$\Phi = \frac{1}{w}\int e\,dt;\quad B = \frac{1}{wS}\int e\,dt;$$

$$H = \frac{1}{wS\mu_0}\int e\,dt.$$

При измерении переменного магнитного потока стационарной катушкой уравнение преобразования имеет вид:

$$E = f(\Phi_{max}, \omega),$$

где E — действующее значение ЭДС; Φ_{max} — максимальное значение магнитного потока; ω — частота изменения его.

Для импульсных преобразователей (выдергивание катушки из постоянного поля, импульсное изменение потока при стационарной катушке) уравнение преобразования выглядит как

$$rQ = \Delta\Psi = \int e\,dt,$$

где $\Delta\Psi$ — изменение потока, сцепленного с катушкой; Q — количество электричества; r — сопротивление измерительной цепи.

Вращение измерительной катушки в постоянном поле приводит к уравнению вида

$$E = f(\Phi, \omega).$$

При измерении индукции постоянного поля катушками с изменяющимся сечением на основе пьезострикционного эффекта уравнение преобразования имеет вид:

$$E = f(B, \omega),$$

а на основе электрострикционного эффекта

$$E_2 = f(B, \omega),$$

где E_2 — действующее значение ЭДС четной (чаще второй) гармоники сигнала; ω — частота изменения сечения катушки.

Из гальваномагнитных эффектов в технике магнитных измерений нашли применение эффекты Холла и магниторезистивный (см. § 3.1). Если через полупроводниковую пластину (рис. 6.19), помещенную в магнитное поле с индукцией B, пропустить электрический ток I, между точками x и x возникнет разность потенциалов E_x, называемая ЭДС Холла. Связь ее с магнитной индукцией имеет вид:

$$E_X = R_X\frac{IB}{d} = f(I, B) = S_п B,$$

где R_X — постоянная Холла, зависящая от концентрации и подвижности носителей зарядов; d — толщина пластины; $S_п$ — чувствительность преобразователя при номинальном токе питания.

Магниторезистивный эффект (эффект Гаусса) заключается в изменении сопротивления материала в магнитном поле. Уравнение преобразования, связывающее относительное изменение сопротивления материала и индукцию исследуемого поля, имеет вид:

$$\frac{\Delta r}{r} = f(B^m),$$

где m — показатель, изменяющийся в пределах 1—2.

Магниторезистивные преобразователи выполняются в виде диска Корбино или прямоугольных пластин (рис. 6.20). Сравнительные характеристики некоторых из них приведены на рис. 6.21.

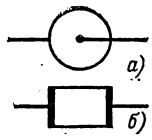


Рис. 6.20. Конфигурация преобразователей магнитосопротивления: *а* — диск Корбино; *б* — прямоугольный преобразователь

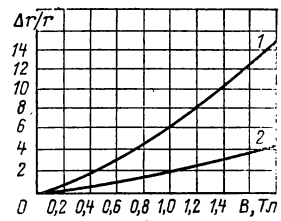


Рис. 6.21. Сравнительные характеристики преобразователей магнитосопротивления: *1* — диск Корбино; *2* — прямоугольный преобразователь

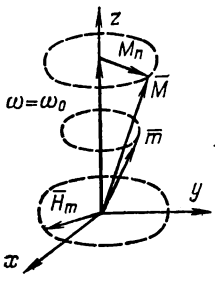


Рис. 6.22. Картина взаимодействия магнитных моментов с магнитным полем

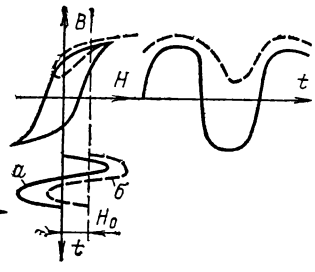


Рис. 6.23. Принцип действия феррозондового преобразователя

Особое воздействие магнитного поля на поведение элементарных частиц заключается в избирательном поглощении или излучении электромагнитных волн веществом. Различают в зависимости от природы частиц ядерный магнитный (ЯМР), электронный парамагнитный (ЭПР) и ферромагнитный резонанс (ФМР).

Сущность ЯМР заключается в резонансном поглощении веществом электромагнитного излучения при переходах ядер на соседние энергетические уровни. Изменение энергии ΔE, вызванное переходами ядер между энергетическими уровнями, связано с частотой электромагнитного поля, имеющего круговую поляризацию в направлении, перпендикулярном B. Взаимодействие между системой ядер и электромагнитным полем наступает в случае, когда частота последнего имеет определенное значение

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{\gamma}{2\pi} B,$$

где γ — гиромагнитное отношение; h — постоянная Планка.

Картина взаимодействия прецессирующих магнитных моментов $\bar{m}$ с вращающим магнитным полем амплитуды H_{max} представлена на рис. 6.22. Если угловая скорость поля ω соответствует резонансному значению ω_0, то образующие поперечные составляющие намагниченности $M_п$ вектора $\bar{M}$ определяют резонансную частоту.

Сущность электронного парамагнитного резонанса принципиально не отличается от рассмотренного ЯМР. Отличие лишь в резонансной частоте.

Особенность ферромагнитного резонанса заключается в том, что здесь приходится иметь дело с группой атомов, связанных обменным взаимодействием. Вокруг вектора B прецессирует момент домена (см. § 3.2) и в результате резонансное поглощение на несколько порядков больше, чем у парамагнитных веществ.

Известно, что при одновременном воздействии постоянного и переменного магнитного полей изменяются характеристики ферромагнитных материалов. На этом принципе основан метод измерения параметров магнитного поля с помощью так называемых феррозондовых (магнитомодуляционных) преобразователей. Сущность метода заключается в том, что при перемагничивании переменным полем ферромагнитного материала, являющегося основной частью первичного преобразователя, гистерезисный цикл получается симметричным; при наложении постоянного измеряемого магнитного поля H_0 изменение состояния происходит по несимметричному циклу (рис. 6.23). В этом случае переменная составляющая индукции содержит и четные гармоники. Экспериментально показано, что амплитуда второй гармоники B_{2max} на некотором интервале изменения постоянного поля линейно связана с H_0. Таким образом, уравнение преобразования измеряемого магнитного поля в электрический сигнал имеет вид:

$$E_{2max} = f(H_0),$$

где E_{2max} — амплитуда второй гармоники ЭДС, наводимой в измерительной катушке.

Для измерения индукции и напряженности поля широко используются методы взаимодействия измеряемого поля с полем вспомогательного тока и полем постоянного магнита. Если в контуре, расположенном в магнитном поле (рис. 6.24), протекает ток I, создается вращающий момент

$$M_{вр} = ISB \sin\alpha,$$

где S — площадь, охватываемая контуром; α — угол, образуемый плоскостью контура и вектором индукции B.

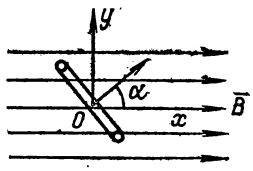
При создании противодействующего момента $P\alpha$, равного $M_{вр}$ (P — удельный противодействующий момент), в состоянии равновесия справедливо соотношение

$$P\alpha = ISB \sin\alpha,$$

откуда и вытекает уравнение преобразования

$$\frac{\alpha}{\sin\alpha} = \frac{IS}{P} B = f(B).$$

Рис. 6.24. Принцип действия механических преобразователей, основанных на взаимодействии магнитного поля и витка с током



На этом методе основаны магнитные весы, позволяющие с большой точностью измерять магнитную индукцию. Применяется этот метод также в устройствах отбраковки постоянных магнитов.

Метод взаимодействия измеряемого поля с полем постоянного магнита (рис. 6.25) нашел практическую реализацию в магнитных компасах, буссолях, теодолитах, астатических магнитометрах и других приборах, предназначенных для работы в полевых условиях.

Для измерения слабых магнитных полей иногда используют явление магнитострикции, заключающееся в относительном изменении размеров тела под действием магнитного поля или, что то же самое, с изменением его намагниченности. Большим ограничением использования явления магнитострикции в практике измерений является влияние на коэффициент преобразования внешних механических воздействий.

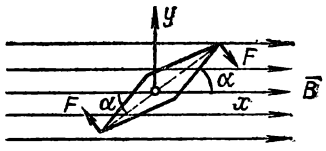


Рис. 6.25. Принцип действия механических преобразователей, основанных на взаимодействии магнитного поля с постоянным магнитом

Кроме рассмотренных явлений для измерения магнитных величин могут быть использованы и другие эффекты, не получившие пока широкого распространения в практике. К ним относятся эффекты Фарадея, Зеемана, Керра, Коттона — Мутона, Джозефсона и др. [6.11, 6.12].

Методы измерения магнитных величин лежат в основе испытаний магнитных материалов. Все ферромагнитные материалы (ФММ) делятся на магнитно-твердые (МТМ) и магнитно-мягкие (МММ). Первые используются в качестве источников постоянных магнитных полей (постоянные магниты). Для них к настоящему времени сложились три направления испытаний: исследование свойств МТМ, производственный контроль образцов МТМ, производственный контроль постоянных магнитов. При исследовании свойств МТМ необходимо получать достаточно полную информацию о свойствах материала: начальная кривая намагничивания, предельная петля магнитного гистерезиса, кривые возврата для различных точек размагничивающего участка и др. Измерение индукции производится, как правило, индукционными и гальваномагнитными преобразователями. Измерение напряженности поля обычно сводится к измерению тока в намагничивающих устройствах или получению информации о тангенциальной составляющей напряженности поля от индукционных или гальваномагнитных преобразователей. Перемагничивание МТМ может быть осуществлено постоянным и переменным полем [6.12, 6.18, 6.19]. При намагничивании материала постоянным полем получаются статические характеристики. При непрерывном циклическом изменении поля получаются динамические характеристики, которые в инфранизком диапазоне частот перемагничивания могут быть приближены к статическим с необходимой точностью.

Для обеспечения правильности процесса производства МТМ и соответствующей коррекции технологического режима контролируются наиболее важные отдельные параметры материала, в частности коэрцитивная сила H_c. Алгоритм получения H_c сводится к фиксации нулевых значений магнитной индукции или намагниченности и отсчету напряженности поля.

В основе классификационных признаков контроля постоянных магнитов лежат вид контролируемых параметров, способ получения информации. Различают контроль по магнитному потоку в системе, близкой к рабочей; контроль по размагничивающему участку. По способу получения выходной информации различают устройства с непосредственным отсчетом и дифференциальным способом измерения — получением информации в виде разности характеристик образцового и испытуемого магнитов.

Магнитно-мягкие материалы характеризуются магнитными параметрами, измеряемыми в постоянном и переменном полях. Согласно [6.13] основными измеряемыми характеристиками в постоянных полях для МММ являются: основная кривая намагничивания, предельная петля гистерезиса и ее параметры (B_r, H_c), начальная и максимальная магнитные проницаемости. ГОСТ 8.377-80 устанавливает в качестве основного балластический метод исследования свойств материала. В настоящее время в связи с разработкой промышленностью унифицированных электронных устройств широкого применения получил распространение метод непрерывного медленно изменяющегося поля [6.14].

В переменных полях основными характеристиками МММ являются основная динамическая петля гистерезиса, комплексная магнитная проницаемость и удельные потери. Кроме того, в зависимости от частотного диапазона испытания существует еще целый ряд определяемых характеристик и параметров. Наиболее часты испытания МММ в частотном диапазоне 50 Гц — 10 кГц. Основными методами испытания в этом диапазоне частот согласно ГОСТ 18334-73 являются: индукционный с использованием амперметра, вольтметра, ваттметра; индукционный с использованием компенсатора переменного тока; индукционный с использованием фазочувствительных приборов (феррометрический); индукционный с использованием феррографа (осциллографический); индукционный с использованием стробоскопических преобразователей; параметрический (мостовой).

Индукционные методы характеризуются измерением ЭДС, индуцированных в измерительных катушках. Использование амперметра и вольтметра дает возможность определения динамической относительной проницаемости. Являясь наиболее простым, этот способ измерения обладает большой погрешностью (до 10 %) и не обеспечивает возможности определения потерь в образцах. Использование ваттметра стандартизировано для определения потерь в образцах из МММ. Преимуществами ваттметрового способа являются простота и высокая производительность, сравнительно небольшая для промышленных испытаний погрешность измерения (5—8 %), широкий частотный диапазон испытания (до 10 кГц) [6.15—6.17]. К недостаткам следует отнести малый объем информации и увеличение погрешности при перемагничивании до индукции свыше 1,2 Тл из-за отклонения формы кривой от синусоидальной.

В основу феррометрического способа измерения положено определение мгновенных значений периодических несинусоидальных величин с помощью фазочувствительных приборов. Связь среднего значения производной функции и мгновенного значения самой функции является здесь основой использования инерционных приборов для регистрации динамических характеристик МММ:

$$E_{ср} = \frac{2}{T}\int_{t}^{t+T/2} e\,dt = 4fSwB,$$

где $E_{ср}$ — среднее значение ЭДС измерительной катушки.

К преимуществам феррометрического способа измерения относятся: малая погрешность (2—5 %); возможность определения большого числа магнитных характеристик, в том числе и расчета потерь. Недостатками способа являются ограниченность размеров образцов и частотного диапазона; длительность процесса измерений и обработки результатов; относительно высокая стоимость устройств.

Осциллографическим способом пользуются для измерения и визуального наблюдения основной динамической кривой намагничивания, семейства симметричных петель гистерезиса, потерь в образцах на частотах от 50 до 500 Гц. К недостаткам способа следует отнести необходимость измерений на экране осциллографа, что связано с увеличением объективных и субъективных погрешностей отсчета.

Наиболее точным из индукционных методов испытания МММ является метод, основанный на измерении сигналов, пропорциональных B и H, с помощью компенсаторов переменного тока. Этим способом определяются зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля, составляющие комплексной магнитной проницаемости, полные потери. Достоинствами способа являются высокая точность измерения и широкий диапазон измеряемых величин. К недостаткам относятся: длительность процесса измерения, высокая стоимость используемой аппаратуры и ее сложность.

Сущность стробоскопического способа измерения заключается в том, что исследуемые периодически изменяющиеся сигналы произвольной формы умножаются на так называемый строб-импульс. При этом перемножение в каждом последующем периоде происходит со сдвигом во времени на некоторый интервал (шаг считывания) по отношению к предыдущему. В результате можно произвести и затем воспроизвести считывание всего периода исследуемого сигнала по точкам. Это дает возможность, как и при феррометрическом способе, использовать для регистрации быстроизменяющихся процессов инерционные самопишущие и цифропечатающие приборы. Основным достоинством стробоскопического способа измерения является возможность получения документальной информации о характеристиках ФММ в процессе перемагничивания последних.

Параметрический метод испытания магнитных материалов заключается в определении индуктивности и сопротивления катушки с испытуемым магнитопроводом путем уравновешивания мостовой схемы. В основном этот метод предназначен для определения характеристик в области слабых полей. Преимуществами его являются: высокая точность измерения, широкий частотный диапазон испытания. К недостаткам относятся: зависимость результатов измерения от индуктивных и емкостных помех, создаваемых элементами схемы измерения; увеличение погрешности на низких частотах испытания; сложность и длительность процесса испытания.

Существуют и другие методы испытания МММ в динамическом режиме перемагничивания, однако технико-эксплуатационные характеристики устройств на их основе не эффективны в условиях массовых испытаний, поэтому они не рассматриваются.

6.7. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Основными классами средств магнитных измерений являются: магнитные меры; магнитоизмерительные преобразователи; магнитоизмерительные приборы, установки и системы.

Магнитные меры разделяются на меры магнитного потока, магнитной индукции, магнитного момента. К магнитным мерам относятся также образцы магнитных материалов.

Магнитоизмерительные преобразователи, являясь основными элементами средств измерений определяют рассмотренные выше методы измерения магнитных величин. Различают индукционные, феррозондовые, механические, гальваномагнитные, квантовые и другие преобразователи.

Наиболее распространенным для систематизации магнитоизмерительных приборов является принцип использования физического явления в первичных преобразователях магнитных величин. Существует классификация, позволяющая объединять различного типа приборы в группы для осуществления конкретной цели: измерение параметров постоянного магнитного поля; измерение параметров переменного магнитного поля; измерение параметров неоднородного магнитного поля и т. д. Разбиение приборов по такому признаку позволяет выработать единые критерии для оценки их метрологических и технико-эксплуатационных характеристик. Различают и другие признаки деления приборов, для ознакомления с которыми можно рекомендовать [6.10, 6.11]. Наименование прибора, установки или системы должно отражать название единицы измеряемой величины и функциональное назначение. Так как в приборах могут быть использованы различные магнитоизмерительные преобразователи, к наименованию прибора целесообразно добавлять наименование преобразователя. В связи с этим различают: веберметры, тесламетры (индукционный, феррозондовый, гальваномагнитный, магнитометрический, ядерный), коэрцитиметры, установки для испытания ФММ, устройства для контроля постоянных магнитов.

Веберметры. Веберметры представляют собой приборы для измерения магнитного потока. Широко применяются они для исследования магнитных свойств различных материалов и при измерении характеристик магнитных полей. Принцип действия их основан на явлении электромагнитной индукции. Элементы теории, особенности применения, эксплуатации и ремонта достаточно подробно рассмотрены в [6.20].

Особенностью веберметров с измерительным механизмом в виде закрепленной на кернах или растяжках подвижной части является сползание указателя от достигнутого максимального отклонения в положение, соответствующее нулю противодействующего момента, причем по мере роста сопротивления внешней цепи скорость сползания увеличивается, что в конечном счете приводит к погрешностям отсчета результатов измерения. Поэтому в числе паспортных характеристик веберметров приводят

Таблица 6.15. **Технические характеристики веберметров**

Наименование прибора	Пределы измерения	Внешнее сопротивление, Ом	Основная погрешность, %	Скорость сползания
Милливеберметр М19	10 мВб	8—20	2,5—4,0	0,1 мВб/с
Милливеберметр М119	10 мВб	8—20—30	1,5—2,5—4,0	0,05 мВб/с
Микровеберметр М199	500 мкВб	50	1,5	2,5 мкВб/с
Микровеберметр Ф18	15—75—300 мкВб	100	4,0—2,5—1,5	0,04—0,06 —0,1 мкВб/с
Микровеберметр Ф190	2—5—10—20—50—100—500 мкВб	100—300	2,5—1,5	0,005—0,3 мкВб/с
Микровеберметр Ф199	25—50—100—250—500—1000—2500 мкВб	100—1000	$(0,05—0,03)\ \Phi_к/\Phi_х$	—
Микровеберметр Ф5050	10—100—1000—10 000 мкВб	100	$(0,003—0,002)\Phi_к/\Phi_х$	—
Флюксметр М-3А/3D (США)	1—10 000 мВб	100	1,0	1 мкВб/мин

значения внешнего сопротивления и скорости сползания указателя. В табл. 6.15 приведены краткие технические характеристики некоторых приборов. Основной тенденцией в усовершенствовании этого класса приборов является увеличение разрешающей способности, уменьшение погрешности, обеспечение некритичности к внешнему сопротивлению. Методы и средства проверки веберметров, выпускаемых из производства и ремонта, нормированы ГОСТ 13001-67 [6.21]. В ряде случаев приборы, основанные на индукционном способе измерения, градуируют в единицах измерения магнитной индукции. Приборы эти, носящие название индукционных тесламетров, широко применяются для измерения индукций постоянных, переменных и импульсных магнитных полей, для измерения градиента неоднородного магнитного поля, намагниченности ферромагнитных материалов.

Гальваномагнитные тесламетры. Широкое распространение в практике магнитных измерений нашли приборы с гальваномагнитными преобразователями Холла. В самом простейшем варианте структурная схема тесламетра представлена на рис. 6.26, где *ПХ* — преобразователь Холла, *ИП* — источник питания, *ИЦ* — измерительная цепь, *ВП* — выходной прибор.

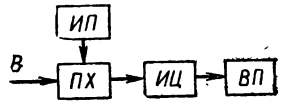


Рис. 6.26. Структурная схема тесламетра Холла

Для измерения постоянных магнитных полей обычно *ПХ* питается от источника постоянного тока, а измерение ЭДС Холла осуществляется непосредственно с помощью показывающего прибора. Для снижения погрешности измерения магнитной индукции до 0,5—0,1 % измеряют ЭДС Холла компенсаторами. С целью уменьшения температурной погрешности *ПХ* изготавливают из материалов со слабой зависимостью постоянной Холла от температуры (In As, In As P). Применяют также схемы температурной компенсации и термостатирование. Для уменьшения погрешности от нелинейности амплитудной характеристики *ПХ* используют компенсаторы с нелинейными элементами. Однако эффективность их низка, если учитывать необходимость смены преобразователей при повреждении. С целью увеличения разрешающей способности выходная часть холловского тесламетра изготавливается в цифровом варианте. Нижний предел измерения тесламетров ограничивается нестабильностью термо-ЭДС и напряжения неэквипотенциальности. Поэтому во многих разработках используют переменный ток питания *ПХ* [6.22] Верхний предел измерения тесламетров практически не ограничен. Существуют варианты увеличения чувствительности и уменьшения аддитивной составляющей погрешности с помощью схем автоматического управления током питания *ПХ*. В табл. 6.16 приведены технические характеристики тесламетров для измерения индукции постоянных магнитных полей.

Так как гальваномагнитные преобразователи являются малоинерционными приборами (постоянная времени 10^{-8}—10^{-9} с), их используют в приборах для измерения переменных и импульсных магнитных полей. Для уменьшения паразитных наводок со стороны измеряемого поля *ПХ* питают переменным током, частота которого выбирается на порядок выше частоты измеряемой индукции. Наилучшая помехозащищенность достигается, если

Таблица 6.16. **Технические характеристики гальваномагнитных тесламетров для измерения постоянных магнитных полей**

Наименование прибора	Страна-изготовитель	Пределы измерения	Класс точности, погрешность, %
Ш1-8	СССР	0,01—1,6 Тл	1,5
Прибор комбинированный Щ4311	СССР	Аксиальные поля 2—20 мТл; радиальные поля 2—2000 мТл	1,0 0,5
Прибор комбинированный цифровой Щ4310	СССР	2—200 мТл	1,5
Прибор комбинированный Ф4308	СССР	20—2000 мТл	1,5
Теслаамперметр Ф4354/1	СССР	150, 300, 600, 1500 мТл	2,5
Миллитесламетр Ф4355	СССР	10—1500 мТл	2,5
Гауссметры моделей 110, 240 и 900	США	10^{-5}—3 Тл	1—2,5
Измеритель магнитной индукции типа 1541	ФРГ	10^{-4}—2 Тл	1,0
Гауссметр ETS-63	ПНР	10^{-3}—1 Тл	1—5
Гауссметр «Метра»	ЧССР	0,2—0,5—2 Тл	2,5

Таблица 6.17. **Технические характеристики некоторых гальваномагнитных тесламетров для измерения индукции переменных магнитных полей**

Наименование прибора	Страна-изготовитель	Пределы измерения	Частотный диапазон	Класс точности, погрешность, %
Прибор Ф4356	СССР	0,1—100 мТл	20 Гц—20 кГц	4
Измеритель магнитной индукции	СССР	40, 100, 200 мТл	30 Гц—10 кГц	2,5
Гауссметр:				
модель 350	США	0,01—0,3 Тл	10 Гц—30 кГц	2
модель 750*	США	10^{-6}—5 Тл	До 400 Гц	—
модель MG-2A	США	10^{-3}—3 Тл	25 Гц—4 кГц	3
модель MG-3A/3Д*	США	10^{-4}—10 Тл	До 400 Гц	3/1
Гауссметр ММ-11*	Япония	0,002—2 Тл	До 500 Гц	1,5

* Приборы используются для измерения индукции как переменных, так и постоянных полей.

частота измеряемой индукции имеет строго фиксированное значение. Характеристики тесламетров для измерения индукции переменных полей приведены в табл. 6.17.

Механические тесламетры. Для измерения магнитного поля Земли используются приборы с механическими преобразователями, называемые магнитометрами. Широко известны магнитный компас, теодолиты, магнитная буссоль. Абсолютные магнитные теодолиты применяются для измерения индукций слабых полей. При этом погрешность измерения может быть доведена до сотых долей процента. Гораздо шире используются приборы, основанные на относительных методах измерения: кварцевые и крутильные магнитометры, различного рода магнитные весы. Магнитометры с постоянными магнитами до настоящего времени занимают важное место в магнитоизмерительной технике ввиду большой чувствительности, надежности и возможности использования в полевых условиях (табл. 6.18).

Таблица 6.18. **Технические характеристики некоторых магнитометров**

Наименование прибора	Пределы измерения, нТл	Цена деления, нТл	Погрешность отсчета, дел., измерения, нТл
Магнитометр М-2	16 000	10—80	0,1—0,2 дел.
Магнитометр М-14	45 000	10	2—3 нТл
Магнитометр М-14Ф	—	1—2	0,1—0,2 дел.
Магнитометр М-18	3 000 27 000 (расшир.)	10	3 нТл
Магнитометр М-27	3 000 36 000 (расшир.)	10	5 нТл
Магнитометр МА-21	—	(5—7)·10—2	0,1—0,2 дел.

Приборы с механическими преобразователями применяются и для измерения переменных магнитных полей (вариометры). Однако в силу большой инерционности первичных преобразователей частотный диапазон измеряемых величин ограничивается единицами герц. Основное применение они нашли для регистрации вариаций элементов земного магнетизма: склонения, составляющих магнитной индукции поля Земли.

Феррозондовые тесламетры. Известно большое количество феррозондовых (магнитомодуляционных) приборов, измеряющих индукцию магнитного поля или ее приращение. Методы расчета их и особенности применения рассмотрены подробно в [6.10, 6.11]. Наибольшее распространение получили приборы с так называемыми дифференциальными феррозондами продольного возбуждения. На рис. 6.27 приведена схема соединения обмоток подобного типа феррозондового преобразователя. Обмотки возбуждения соединены последовательно-встречно. При отсутствии измеряемого поля H_0 ЭДС e_1 и e_2 пропорциональные скорости изменения магнитных потоков Φ_1 и Φ_2, возбуждаемых переменным полем H, равны по величине и противоположны по фазе — выходное напряжение $u_{вых}$ равно нулю. В присутствии постоянного измеряемого поля перемаг-

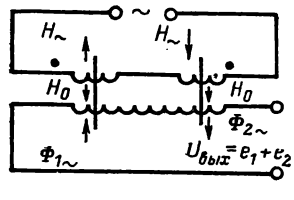


Рис. 6.27. Схема соединения обмоток феррозондового преобразователя с продольным возбуждением

Таблица 6.19. **Технические характеристики некоторых феррозондовых тесламетров**

Наименование прибора	Страна-изготовитель	Пределы измерения	Порог чувствительности, погрешность	Смещение нуля
Аэромагнитометр АМ-13	СССР	11 000 нТл	4 нТл	5 нТл/ч
Аэромагнитометр АСГ-46	СССР	6000 нТл	4 нТл	5 нТл/ч
Магнитометр М-17	СССР	50—250—1000—3000—...—6000 нТл	1 %	5 нТл/ч
Прибор Г71	СССР	5—10—20 кА/м	1,5 %	6 А/м
Магнитометр 1964	Финляндия	2,5—7,5—25—75—250 мкТл	10 нТл	—
Магнитометр MF-1-100	Канада	0,1—0,3—1—3—10—30—100 мкТл	0,5 нТл	—

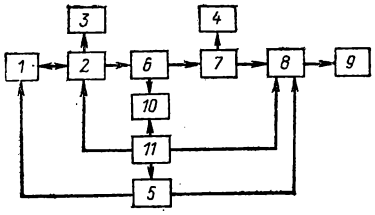


Рис. 6.28. Структурная схема тесламетра Ш1-1:

1 — первичный преобразователь ЯМР; *2* — высокочастотный генератор; *3* — гетеродинный волномер; *4* — осциллограф; *5* — генератор низкой частоты; *6* — детектор; *7* — усилитель; *8* — синхронный детектор; *9* — магнитоэлектрический прибор; *10* — индикатор генерации; *11* — источник питания

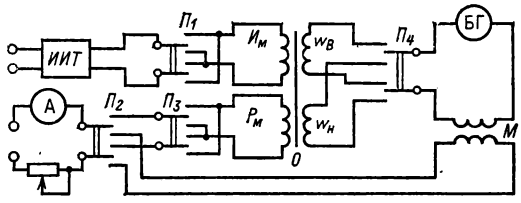


Рис. 6.29. Схема устройства для испытания МТМ при импульсном намагничивании:

ИИТ — источник импульсного тока; $И_м$ — импульсная намагничивающая катушка; $Р_м$ — размагничивающая катушка; $w_в$ — измерительная катушка индукции; $w_н$ — измерительная катушка напряженности поля; *А* — амперметр; *М* — катушка взаимной индуктивности; *БГ* — баллистический гальванометр; $П_1$—$П_4$ — переключатели; *О* — испытуемый образец

ничивание материала магнитопроводов происходит по несимметричным циклам и в ЭДС появятся четные гармоники, а на выходе преобразователя получается суммарная ЭДС четных гармоник. Основным источником погрешности здесь является нестабильность нуля приборов, обусловленная наличием гистерезиса и магнитной вязкости при перемагничивании материала магнитопроводов. В табл. 6.19 приведены технические характеристики некоторых феррозондовых тесламетров отечественного и зарубежного производства для измерения магнитной индукции постоянных полей.

Анализ работы феррозондовых тесламетров для измерения переменных полей приведен в [6.10]. Отметим некоторые особенности этих приборов: 1) выходной сигнал первичных преобразователей пропорционален значению магнитной индукции, а не ее производной; 2) схемы усиления простые, так как частота модулированного выходного сигнала преобразователя значительно выше частоты измеряемого поля; 3) как следствие п. 2 фазовые искажения минимальны, что повышает устойчивость работы приборов и стабильность чувствительности.

Следует отметить, что из-за неравномерности спектральной плотности шумов феррозондового преобразователя порог чувствительности приборов для измерения переменного поля ниже, чем приборов для измерения постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей.

Тесламетры на основе ЯМР. Наибольшей точностью измерения постоянных полей отличаются приборы на основе ЯМР. В геофизической практике широкое применение нашли серийно выпускаемые магнитометры ПМ-1, ПМ-5, М-20. Аналогичные разработки имеются и за рубежом [6.23]. Магнитометры на основе ЯМР используются и как измерители сильных магнитных полей, а также в качестве образцовых при поверке тесламетров более низкого класса точности. В СССР серийно выпускается тесламетр Ш1-1 (прежнее название ИМИ-2), структурная схема которого приведена на рис. 6.28. В табл. 6.20 приведены технические характеристики тесламетров на основе ЯМР.

Устройства для испытания МТМ. Устройства для испытания МТМ при импульсном изменении внешнего поля являются классическими и имеют наиболее высокие точностные показатели. Этим объясняется применение их в области метрологической службы и при точных лабораторных измерениях. Структурная схема установки, рекомендуемой ГОСТ 8.268-77 для исследования образцов, приведена на рис. 6.29. Особенностью схемы является наличие импульсного источника тока для намагничивания испытуемого материала до насыщения и размагничивание его с использованием источника постоянного тока. Наиболее совершенной разработкой рассматриваемого класса устройств является выпускаемая заводом «Точэлектроприбор» измерительная информационная система У5056. Эта система обеспечивает измерение *B* и *H* в любой точке кривой раз-

Таблица 6.20. **Технические характеристики магнитометров на основе ЯМР**

Наименование прибора	Страна-изготовитель	Пределы измерения	Погрешность, %
Протонный магнитометр ПМ-1	СССР	35 000—55 000 нТл	0,001
Протонный магнитометр ПМ-5	СССР	40 000—65 000 нТл	0,003
Магнитометр М-20	СССР	35 000—70 000 нТл	0,005—0,01
Ш1-1 (ИМИ-2)	СССР	0,025—2,5 Тл	0,01—0,1
ИМП-3	СССР	0,05—2,75 Тл	0,004—0,3
Магнитометр ЯМ-1	СССР	$5 \cdot 10^{-2}$—2,5 Тл	0,01
Магнитометр М-49	США	19 000—100 000 нТл	—
Протонный магнитометр	Англия	24 000—70 000 нТл	0,002
Протонный магнитометр	Япония	30 000—58 000 нТл	—
Аэромагнитометр МР-121	Франция	30 000—75 000 нТл	—
Магнитометр G502	США	0,0305—8,5 Тл	0,001

магничивания при импульсном намагничивании и размагничивании плавно изменяющимся полем. Значение отсчитываемых параметров производится с помощью цифровых гистерезиметров Ф5155/1,2. Предельное значение H, кА/м, создаваемое током размагничивания, определяется соотношением

$$H = \frac{2{,}5 \cdot 10^4}{55 + l},$$

где l — длина зазора для помещения образца, мм.

Погрешность измерения H_c и B не превышает 3 %. Время измерения одной точки зависимости $B(H)$ менее 30 с.

В настоящее время разработаны устройства с циклическим изменением внешнего перемагничивающего поля и непрерывным измерением магнитной индукции и напряженности поля. Запись результатов производится на самопишущих приборах, электронно-лучевых трубках и в табличной форме. Примерами опытных разработок являются феррометр и компенсационное измерительное устройство НПИ [6.24], магнитоизмерительные системы МЭИ [6.14] и ряд зарубежных приборов и систем [6.23]. В табл. 6.21 приведены технические характеристики ряда устройств для испытания МТМ отечественного и зарубежного производства.

Одним из параметров, характеризующих качество образцов МТМ, является коэрцитивная сила H_c. В зависимости от типа первичного преобразователя, фиксирующего равенство нулю магнитной индукции или намагниченности материала, различают коэрцитиметры с индукционными, феррозондовыми и гальваномагнитными преобразователями. Схема коэрцитиметра с гальваномагнитными преобразователями Холла приведена на рис. 6.30. Испытуемый образец *4* располагается в межполюсном пространстве электромагнита *2*. Значение H_c измеряется с помощью преобразователя Холла *7* и выходного прибора H. Индикатором нуля намагниченности является преобразователь Холла *5* и прибор M. Питание преобразователей осуществляется от источника *1*. Намагничивание образца осуществляется с помощью катушек *6*, питаемых от генератора одиночных импульсов 8, плавное размагничивание — с помощью катушек *3* от источника *1*. На основе этой разработки заводом «Точэлектроприбор» серийно выпускался

Таблица 6.21. **Технические данные некоторых устройств для испытания МТМ**

Тип устройства	Страна-изготовитель	Длина образцов, мм	Напряженность поля, кА/м	Погрешность, %
У-541	СССР	20—60	H_c=10÷120	3
УПМ-68	СССР	40—60	$H_c \ll 250$	3
У 5056	СССР	4—100	H_m=450	3
Устройство 3257-3	Япония	10	H_m=1200	—
МН-10	США	2	H_m=1680	1
МН-30	США	6,4	H_m=2800	1
МН-40	США	6,5	H_m=2800	1
МН-50	США	6,4	H_m=2800	1

Рис. 6.30. Коэрцитиметр с гальваномагнитным преобразователями

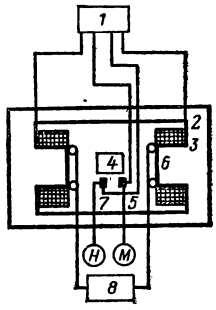


Таблица 6.22. **Технические данные некоторых коэрцитиметров**

Тип коэрцитиметра	Страна-изготовитель	Длина образцов, мм	Напряженность поля, кА/м	Погрешность, %
У5030	СССР	20—66	H_c=400	4
ИКС-1	СССР	25	H_m=400	1,5
МС-10D	США	—	H_m=800	1

коэрцитиметр У5030 (табл. 6.22). С техническими характеристиками опытных образцов коэрцитиметров можно ознакомиться в [6.12].

Особенностью устройств для контроля постоянных магнитов является обеспечение высокой производительности. Контролируемыми параметрами, как правило, являются размагничивающий участок петли магнитного гистерезиса или отдельная точка ($B_р$, $H_р$), характеризующая состояние магнита, близкое к рабочим условиям. В настоящее время существует большое количество разработок Новочеркасского политехнического института, Московского энергетического института, Института электродинамики АН УССР по созданию автоматических устройств для контроля магнитов в серийном производстве. Однако следует заметить, что единой методики контроля до сих пор нет. Поэтому в практике магнитных измерений для указанных целей широко применяют нестандартную аппаратуру [6.12, 6.24].

Устройства для испытания МММ. Для испытания МММ в постоянных полях ГОСТ 8.377-80 рекомендует использовать измерительную информационную систему У5045, принципиальная схема которой приведена на рис. 6.31. Средства измерения, входящие в установ-

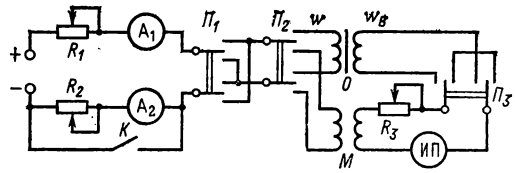


Рис. 6.31. Устройство для определения статических характеристик МММ:
R_1, R_2 — регулировочные реостаты; A_1, A_2—амперметры; K — ключ; $П_1$—$П_3$ — двухполюсные переключатели; w — намагничивающая обмотка; $w_в$ — измерительная обмотка индукции; M — катушка взаимной индуктивности; R_3 — магазин резисторов; $ИП$ — измерительный прибор; O — испытуемый образец.

ку, должны иметь класс точности не ниже 0,2; образцовая катушка взаимной индуктивности должна быть мерой 2-го разряда. В качестве измерителя индукции используется микровеберметр Ф191 или Ф5050. В качестве образцовой катушки взаимной индуктивности используется катушка Р5009, имеющая взаимную индуктивность $M=0{,}001$ и 0,01 Гн. Измерителем тока служат приборы М1104 (0,75—750 мА; 1,5—30 А) класса точности 0,2; М17, имеющие внешнее критическое сопротивление 40 — 250 Ом, период собственных колебаний 18—20 с.

Примером реализации стандартной методики испытания МММ в постоянных полях является установка «Автостатика», схема которой приведена на рис. 6.32. Здесь *ЭНУ* — электронное намагничивающее устройство, формирующее двухполярный намагничивающий (размагничивающий) ток; *ПН* — панель намагничивания, предназначенная для установки испытуемых образцов на общую намагничивающую обмотку; *РУ* — регистрирующее устройство, включающее серийно выпускаемые приборы для измерения намагничивающего тока, магнитного потока и печатания результатов измерения (М17/11, Ф101, Ф5050, ВК2-20, Ф5053).

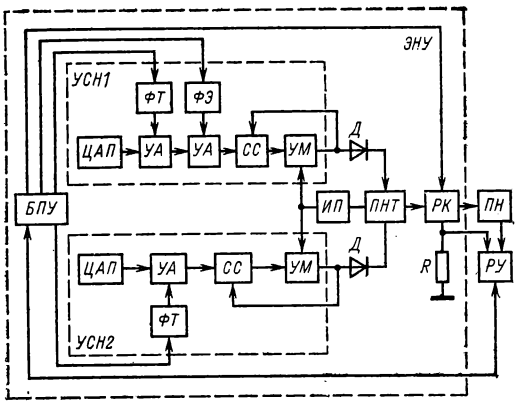


Рис. 6.32. Схема установки «Автостатика»

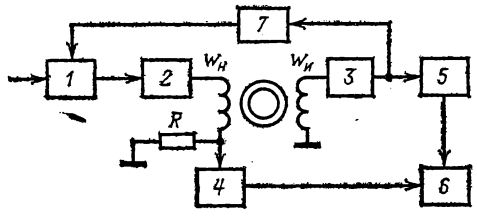


Рис. 6.33. Структурная схема МИС-1Н МЭИ:

1 — задающее устройство; *2* — усилитель мощности; *3* и *4* — усилители; *5* — интегратор; *6* — регистрирующий прибор; *7* — звено отрицательной обратной связи; $w_и$ и $w_н$ — измерительная и намагничивающая катушка; *R* — резистор

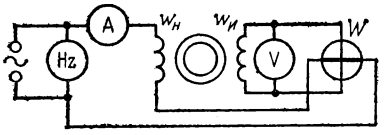


Рис. 6.34. Схема измерения динамических характеристик методом амперметра, вольтметра, ваттметра: *A* — амперметр; *V* — вольтметр; *W* — ваттметр; $w_и$ и $w_н$ — измерительная и намагничивающая катушки

ЭНУ содержит два управляемых стабилизатора напряжения *УСН1* и *УСН2*, включающих цифро-аналоговые преобразователи *ЦАП*, управляемые аттенюаторы *УА*, формирователи трапецеидальных импульсов *ФТ*, схемы сравнения *СС* и усилители мощности *УМ*; блок программного управления *БПУ*; источник питания *ИП*; разделительные диоды *Д*; преобразователь напряжение — ток *ПНТ*; реверсивный коммутатор *РК* и измерительный резистор *R*. Стабилизатор *УСН1* кроме того, включает в себя формирователь экспоненты *ФЭ* и дополнительный аттенюатор *УА* для обеспечения режима размагничивания.

Использование разделительных диодов на выходах стабилизаторов упростило задачу формирования ступенчатых импульсов. В данной схеме ток будет определяться тем стабилизатором, у которого в данный момент более высокое выходное напряжение. У другого стабилизатора диод закрыт этим напряжением и стабилизатор отключен от цепи намагничивания. Следовательно, на каждый стабилизатор может быть подан код, непосредственно определяющий значение намагничивающего тока без предварительных арифметических операций.

Внедрение установки в производство позволило отказаться от источника питания в виде аккумуляторной станции и тем самым повысить коэффициент использования установки; повысить на 15—20 % производительность труда по сравнению с У5045 за счет программного управления намагничиванием образцов; уменьшить вероятность субъективных ошибок обслуживающего персонала вследствие программного формирования требуемых законов изменения намагничивающего тока и автоматического считывания выходной информации.

Примером реализации метода медленно изменяющегося поля служит установка, представленная на рис. 6.33. Установка предназначена для записи статических петель гистерезиса кольцевых образцов низкокоэрцитивных материалов на двухкоординатном самопишущем приборе в режиме постоянства скорости изменения индукции. Точностные показатели установки лежат в пределах ±5 %. На этом принципе работают установка У5032, внедренная в производство заводом «Точэлектроприбор» [6.24], и ряд зарубежных разработок [6.23].

Для определения магнитных характеристик электротехнических сталей на соответствие стандарту серийно выпускается комплектное устройство У5033. Измерения производятся на образцах массой 1 и 10 кг. Для испытания МММ в переменных полях широко распространены устройства, использующие индукционный метод измерения с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра. Схема реализации этого метода приведена на рис. 6.34. Метод нашел отражение в отечественных установках У5018, У5010, УМИПТ-1, УМИПТ-2, У5011, У5034, У5021П, У5021ПМ, У5013. Установки У5018 и У5010 используют одновременно методы амперметра-вольтметра, мостовой и ос-

циллографический. Максимальные значения магнитной индукции и напряженности поля определяются по первым гармоникам указанных величин. Установка У5011 менее точна и универсальна, но обладает простой методикой измерения. Особенностью установок УМИПТ-1 и УМИПТ-2 является возможность измерения средней напряженности поля и мгновенного значения ее. Установки У5033 и У5034 имеют более высокую точность и степень автоматизации процесса испытаний. В установке У5021 параметры материала фиксируются на ленте цифропечатающего механизма. Контроль параметров холоднокатаной рулонной стали в процессе непрерывного отжига обеспечивает установка У5013. Здесь предусмотрена документальная запись результатов измерения автоматическим компенсатором и световая сигнализация отклонения B и P от допустимых значений.

Схема реализации феррометрического способа измерения динамических параметров МММ иллюстрируется рис. 6.35. Этот способ лежит в основе установок У542, Ф-2М, Ф-3, Ф5063. Установка У542 измеряет широкий спектр магнитных характеристик, но только на частоте 50 Гц. Хорошей устойчивостью работы и независимостью погрешностей в широком диапазоне частот обладает феррометр Ф-3. Широко распространен в практике магнитных измерений вектормерт Ц50, позволяющий снимать динамический цикл перемагничивания с фиксацией B_{max} и H_{max}. Разработанный заводом «Точэлектроприбор» цифровой феррометр Ф5063 снабжен цифропечатающим устройством; имеется возможность представления информации в графическом виде.

Наибольшей точностью обладают компенсаторы переменного тока. Отечественной промышленностью выпускаются установки У55 и У5015. В установке У55 используется прямоугольно-координатный компенсатор. Измерение средних значений ЭДС осуществляется с помощью фазочувствительных приборов. Установка У5015 работает в широком частотном диапазоне (50—8000 Гц). Схема реализации устройств на основе потенциометрического метода приведена на рис. 6.36.

Схемы рис. 6.37 и 6.38 иллюстрируют реализацию феррографического и мостового методов измерений [6.17]. В СССР выпускается устройство с двухлучевым осциллографом ДЭСО-1, являющееся составной частью установок У5010, У5018.

Принцип работы и основные технические характеристики установок У520, У55, У542, УМИПТ-1, УМИПТ-2, У5010, У5011, У5017, У5018, ДСШУ-М, У5015, Ф-2М, Ф-3 освещены в [6.17]. В табл. 6.23 приведены технические данные некоторых разработанных в последние годы устройств для испытания МММ отечественного и зарубежного производства.

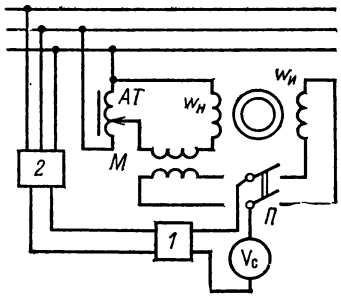


Рис. 6.35. Схема феррометра:

1 — управляемый выпрямитель; *2* — фазовращатель; *AT* — автотрансформатор; *M*—катушка взаимной индуктивности; $w_н$ и $w_и$ — намагничивающая и измерительная катушки; V_c — вольтметр средних значений; *П* — переключатель

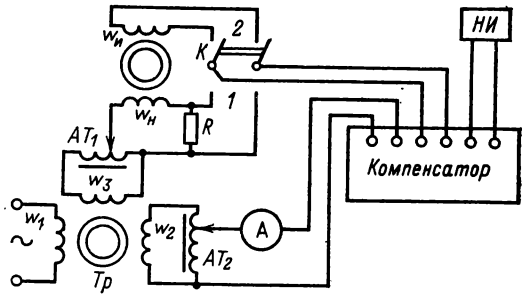


Рис. 6.36. Схема установки для определения характеристик МММ потенциометрическим методом:

w_1, w_2 и w_3 — обмотки трансформатора питания *Тр*; AT_1 и AT_2 — автотрансформаторы; $w_н$ и $w_и$ — намагничивающая и измерительная катушки; *R* — образцовый резистор; *НИ* — нуль-индикатор; *K* — двухполюсный переключатель

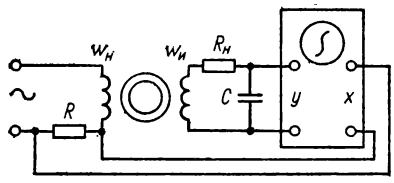


Рис. 6.37. Схема феррографа:

$w_н$ и $w_и$ — намагничивающая и измерительная катушки; $R_н$ и *C* — интегрирующая цепь; *R* — образцовый резистор

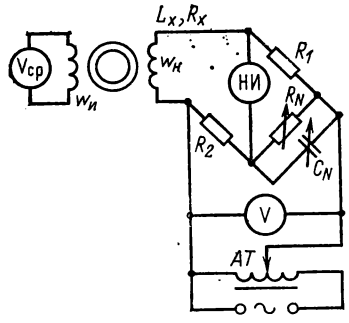


Рис. 6.38. Схема установки для определения характеристик МММ мостовым методом:

AT — автотрансформатор; R_x и L_x — измеряемые сопротивление и индуктивность; C_N и R_N — уравновешивающие конденсатор и резистор; R_1 и R_2 — резисторы; $w_н$ и $w_н$ — намагничивающая и измерительная катушки; *НИ* — нуль-индикатор; *V* и $V_{ср}$ — вольтметры действующего и среднего значения

Таблица 6.23. **Технические данные некоторых установок для испытания МММ**

Тип установки, страна	Частотный диапазон, Гц	Контролируемые параметры и характеристики	Пределы измерения	Погрешность измерения
У5045 (СССР)	0	B_{max} (H_{max}), μ_{rH}, μ_{rmax}, $B(H)$, B_r, H_c	0,01; 0,1; 1; 10 Тл; 0,75—15 А для измерения H	$\gamma_B = \pm 3$ %; $\gamma_H = \pm 3$ %
У5033 (СССР)	50—400	B_{max} (H_{max}), P	В соответствии с ГОСТ 21427.1-83—21427.3-75	$\gamma_H = \gamma_P = \pm 2 \div \pm 5$ %
У5063 (СССР)	25—10 000	$B(H)$, B_{max}, H_{max}, B_r, H_c	0,01; 0,1; 1; 10 Тл для измерения B; 0,01; 0,1; 1; 10 А для измерения H	$\gamma_B = \pm 0{,}5$ % + 1 ед. счета; $\gamma_H = -1$ % + +1 ед. счета
Ферротестер (Венгрия)	20—1000	B_{max} (H_{max}), B_r, H_c, P	28 000 А/м	$\gamma_B = 5 \div 10$ %; $\gamma_H = 5$%
SRB-326 (Япония)	50—10 000	$B(H)$, B_{max}, H_{max}, B_r, H_c, P	800 А/м	$\gamma_B = \gamma_H = \pm 3$ %
МН-20 (США)	0,01—10 000	$B(H)$ и ее параметры	24 000 А/м	$\gamma_B = \pm 1$ %; $\gamma_H = \pm 0{,}5$ %

В табл. 6.24 представлены цены на отечественные и зарубежные приборы, выпускаемые промышленностью в настоящее время.

Таблица 6.24. **Цены на некоторые выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью приборы и установки для магнитных измерений**

Наименование прибора	Цена
Микровеберметр Ф190	615 руб.
Микровеберметр Ф191	570 руб.
Микровеберметр Ф191	520 руб.
Микровеберметр М1119	50 руб.
Микровеберметр Ф5050	345 руб.
Миллитесламетр Ф4355	515 руб.
Миллитесламетр Ф4356	230 руб.
Прибор комбинированный Щ4300	200 руб.
Прибор комбинированный Щ4310	1130 руб.
Прибор комбинированный Щ311	930 руб.
Тесламетр Ш1-1	490 руб.
Тесламетр Ш1-8	510 руб.
Коэрцитиметр КИФМ-1	415 руб.
Комплектное устройство У5033	4200 руб.
Измерительная информационная система У5045	1570 руб.
Измерительная информационная система У5056	3700 руб.
Феррометр Ф5063	650 руб.
Установка МН-1020	22 167 долл.
Магнитометр G-502	5700 долл.
Гауссметр MG-2A	793 долл.
Гауссметр MG-3D	1686 долл.
Флюксометр MF-3D	2365 долл.

Список литературы

6.1. **П. П. Орнатский.** Теоретические основы информационно-измерительной техники. Киев: Вища школа, 1976. 432 с.

6.2. **Электрические** измерения/Л. И. Байда, Н. С. Добротворский, Е. М. Дунин и др.; Под ред. А. В. Фремке. Л.: Энергия, 1973. 424 с.

6.3. **Основы** электроизмерительной техники/М. И. Левин, В. Т. Прытков, Р. М. Демидова-Панферова и др.; Под ред. М. И. Левина. М.: Энергия, 1972. 544 с.

6.4. **Справочник** по электроизмерительным приборам/К. К. Илюнин, Д. Н. Леонтьев, Л. И. Набебина и др.; Под ред. К. К. Илюнина. Л.: Энергия, 1977. 832 с.

6.5. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.

6.6. Электрические измерения (с лабораторными работами)/Р. М. Демидова-Панферова, В. Н. Малиновский, В. С. Попов и др.; Под ред. В. Н. Малиновского, М.: Энергоиздат, 1983. 392 с.

6.7. **Левин М. И., Солодов Ю. С.** Теоретические основы информацконно-измерительной техники (ч. 1). Конспект лекций. М.: Изд-во МЭИ, 1975. 68 с.

6.8. **ГОСТ 20906-75.** Средства измерения магнитных величин, термины и определения.

6.9. **Методы** ядерного магнитного резонанса/Н. Н. Шумиловский, А. Л. Скрипко, В. С. Король и др. — М. — Л.: Энергия, 1966. 140 с.

6.10 **Средства** измерения параметров магнитного поля/Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев, Е. Н. Чечурина, А. П. Щелкин. Л.: Энергия, 1979. 320 с.

6.11. **Чечурина Е. Н.** Приборы для измерения магнитных величин. М.: Энергия, 1969. 168 с.

6.12. **Испытания** магнитных материалов и систем/Е.В. Комаров, А. Д. Покровский, В. Г. Сергеев, А. Я. Шихин. — Под ред. А. Я. Щихина. М.: Энергоатомиздат, 1985.

6.13. **ГОСТ 8.377-80.** Материалы магнитомягкие. Методы испытания в постоянных полях.

6.14. **Шихин А. Я.** Автоматические магнитоизмерительные системы. М.: Энергия, 1977. 136 с.

6.15. **ГОСТ 18334-73.** Материалы магнитомягкие. Методы испытания в диапазоне частот 50 Гц—10 кГц.

6.16. **ГОСТ 12119-80.** Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств.

6.17. **Автоматический** контроль магнитных параметров/Ю. В. Селезнев, Ю. Н. Маслов, Г. Н. Рыжков и др. М.: Высшая школа, 1971. 288 с.

6.18. **ГОСТ 8.268-77.** Материалы магнитотвердые литые. Методы определения статических магнитных характеристик образцов.

6.19. **ГОСТ 21559-76.** Материалы магнитотвердые спеченные. Марки, технические требования и методы контроля.

6.20. **Минц М. Б., Ткаченко А. Н.** Магнитоэлектрические веберметры. Л.: Энергия, 1973. 112 с.

6.21. **ГОСТ 13001-67.** Веберметры. Методы и средства поверки.

6.22. **Хомерики О. К.** Применение гальваномагнитных датчиков в устройствах автоматики и измерений. М.: Энергия, 1971. 112 с.

6.23. **Проспекты** фирмы «Walker», 1970.

6.24. **Устройства** для испытания магнитотвердых материалов. Киев: Наукова думка, 1971. 140 с.

Раздел 7

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

СОДЕРЖАНИЕ

7.1. Основные положения теории подобия и моделирования. Особенности задач электротехники и электроэнергетики . . 219
7.2. Теорема и дополнительные положения о подобии и моделировании 220
Первая теорема (220). Вторая теорема (π-теорема) (221). Третья теорема (222). Дополнительные положения о подобии (222).
7.3. Три способа определения критериев подобия. 223
7.4. Две задачи определения критериев подобия электротехнических, электромеханических и других явлений в электроэнергетических установках 225
7.5. Организация эксперимента и обработка его результатов в критериальной форме. 228
7.6. Реализация физического подобия и моделирования 229
7.7. Реализация аналогового подобия и моделирования 230
7.8. Реализация математического цифрового подобия и моделирования 231
7.9. Требования к точности и достоверность результатов моделирования . . . 232
Принятые сокращения и обозначения . 233
Список литературы 233

7.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Содержание теории подобия — это изучение свойств подобных явлений и методы установления подобия (П). Далее будем понимать [7.1]:

Явление — совокупность процессов, т. е. изменений, происходящих в системе.

Режим — состояние системы, определяющееся множеством различных процессов. Режим может быть установившимся или переходным.

Параметры режима (Пр) — показатели состояния (например, для электрической системы — значения мощности, напряжения, тока, частоты, углов сдвига векторов ЭДС, напряжений, токов и т. д.).

Параметры сцстемы (Пс) — показатели, определяющиеся физическими свойствами элементов системы, схемой их соединений и допущениями расчетного характера. К параметрам электрической системы относятся значения полных, активных и реактивных сопротивлений, коэффициентов трансформации, постоянных времени, коэффициентов усиления и т. д. Например, ток в сопротивлении $\underline{I}=\underline{U}/R$, где $\underline{I}$ и $\underline{U}$ — параметры режима, R — параметр системы.

Системы, у которых Пс неизменны в течение всего изучаемого процесса или изменяются независимо от его протекания, называются соответственно *линейными системами* или системами с *переменными параметрами*. Системы, у которых хотя бы один Пс изменяется в функции одного или нескольких Пр, называются *нелинейными*.

П процессов требует соответствия сходственных величин: геометрических размеров, Пс и Пр. Простейший случай этого соответствия — пропорциональность. Соотношение подобия имеет вид: $P_i/R_i=m_i$, где P_i, R_i — сходственные параметры процессов и элементов рассматриваемых систем: m_i — коэффициент подобия или масштаб сходственных параметров. *Геометрическое подобие* означает, что все пространственные координаты подобных систем пропорциональны. Математически это условие в декартовых координатах записывается следующим образом:

$$x_i/X_i = m_x,\quad y_i/Y_i = m_y,\quad z_i/Z_i = m_z,$$

где x_i, y_i, z_i, X_i, Y_i, Z_i — координаты сходственных точек рассматриваемых систем; m_x, m_y, m_z — масштабы. При неравенстве масштабов по координатным осям, т. е. $m_x \neq m_y \neq m_z$, осуществляется так называемое *аффинное подобие*.

Полное тождество явлений в пространстве и во времени, получаемое после изменения масштаба, свойственно *абсолютному подобию*, которое представляет собой абстрактное понятие. При изучении физических явлений и решении технических задач исследователь не имеет дело со сходством во всех деталях, пользуясь понятиями [7.1]:

Полное подобие — П протекания во времени и в пространстве основных процессов, т. е. тех процессов, которые достаточно полно (для целей данного исследования) определяют изучаемое явление.

Например, можно считать, что у синхронных генераторов электромеханические явления имеют полное П, если все процессы изменения во времени токов, напряжений, вращающих моментов и изменения во времени и в пространстве распределения магнитных и электрических полей отличаются только масштабами. При этом, однако, шумы, нагревы или механические напряжения отдельных деталей могут быть неподобными, так как они заведомо не оказывают существенного влияния на П подлежащих исследованию электромеханических явлений.

Неполное подобие — П протекания процессов только во времени или только в пространстве.

Так, электромеханические процессы в синхронных генераторах могут быть подобны во времени, но пространственное (геометрическое) П полей внутри машины может при этом отсутствовать. Это не искажает П переходных и установившихся режимов в электрической системе.

Приближенное подобие (полное или неполное) характеризуется упрощающими допу-

щениями, заведомо приводящими к искажениям, заранее оцениваемым как допустимые на основании дополнительных аналитических или экспериментальных исследований.

Примером приближенного П является нахождение условий П генераторов на основании упрощенных уравнений, не учитывающих апериодическую составляющую тока статора и периодическую составляющую тока ротора.

Исходя из физической природы подобных явлений, различают:

Физическое подобие, при котором подобные явления имеют одинаковую физическую природу (так, механическим процессам в одной системе обязательно соответствуют механические процессы в подобных ей системах, электрическим процессам — электрические и т. д.).

Математическое (аналого-цифровое) *подобие*, при котором подобные явления имеют различную физическую природу.

Аналогия в данном случае основывается на одинаковой форме (изоморфизме) уравнений, описывающих явления (например, уравнение механического процесса колебаний маятника по форме аналогично уравнению процесса электрических колебаний тока и напряжения в цепи из емкости и индуктивности).

Модель (М) — любой объект (явление, процесс, установка, знаковое образование), находящийся в отношении подобия к моделируемому объекту.

Моделирование (Мод) — исследование промежуточного объекта, базирующееся на его П исследуемому объекту.

В МОД входит построение М, изучение ее и перенос полученных сведений на моделируемый объект.

В электротехнических и электроэнергетических задачах имеются особенности применения методов теории подобия и Мод:

1) к П электрических и электромеханических явлений можно подходить или как к подобию цепей (неполное подобие), или как к подобию полей (полное подобие);

При П цепей геометрическое П может не соблюдаться. Например, подобными могут быть две электрические цепи, содержащие элементы с сосредоточенными параметрами, если схемы включения этих элементов одинаковы. Требование пространственного П вырождается здесь в требование одинаковой конфигурации электрических схем;

2) явления, происходящие в электрических системах или установках, могут быть связаны с тепловыми, механическими и другими процессами, П которых должно устанавливаться одновременно с электромагнитным П;

3) при Мод сложных электроэнергетических систем приходится учитывать, что система в целом обладает качествами, не свойственными образующим ее элементам. Отдельные элементы и подсистемы, взаимодействуя между собой, создают глубокие внутренние связи, которые не позволяют без специальных приемов расчленять систему на независимые составляющие, применяя метод наложения.

В ряде случаев приходится учитывать также нелинейность характеристик, неоднородность и анизотропию систем, влияние стохастических факторов на протекание моделируемых процессов.

7.2. ТЕОРЕМЫ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О ПОДОБИИ И МОДЕЛИРОВАНИИ

Первая теорема

Явления, подобные в том или ином смысле (физически, математически и т. д.), имеют некоторые одинаковые сочетания параметров, называемые критериями подобия[1].

Кратко первая теорема: у всех подобных явлений $\pi = \text{idem}$, где idem означает: соответственно одинаково для всех рассматриваемых процессов.

Критерии подобия любого явления могут преобразовываться в критерии другой формы, получаемые за счет операций перемножения или деления критериев, возведения их в степень или умножения на любой постоянный коэффициент k. В самом деле, если какие-либо значения $\pi_k = \text{idem}$, $\pi_{k+j} = \text{idem}$ являются критериями, то в соответствии с определением П

$$\pi_k \pi_{k+j} = \text{idem}; \quad \pi_k / \pi_{k+j} = \text{idem};$$
$$1/\pi_k = \text{idem}; \quad k\pi_k = \text{idem}.$$

Пусть в цепи, обладающей сопротивлением R_1 и индуктивностью L_1, при включении ее на постоянное напряжение U_1 протекает процесс, описываемый уравнением

$$U_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt_1}.$$

Во второй цепи с параметрами R_2, L_2 протекает подобный первому процесс, уравнение которого

$$U_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt_2}.$$

Разделим эти уравнения соответственно на $i_1 R_1$ и $i_2 R_2$

$$1 - \frac{U_1}{i_1 R_1} + \frac{L_1}{i_1 R_1} \frac{di_1}{dt_1} = 0;$$
$$1 - \frac{U_2}{i_2 R_2} + \frac{L_2}{i_2 R_2} \frac{di_2}{dt_2} = 0.$$

Так как процессы подобны, то

$$U_1 = m_U U_2, \quad i_1 = m_i i_2,$$
$$R_1 = m_R R_2, \quad L_1 = m_L L_2, \quad t_1 = m_t t_2.$$

Проделав подстановку последних выражений в уравнение первого процесса, будем иметь

$$1 - \frac{m_U}{m_i m_R} \frac{U_2}{i_2 R_2} +$$
$$+ \frac{m_L m_i}{m_i m_R m_t} \frac{L_2}{i_2 R_2} \frac{di_2}{dt_2} = 0.$$

[1] Принятый в электротехнических и электроэнергетических задачах термин «критерии подобия» обычно обозначается π. В теплотехнических и гидромеханических задачах наиболее часто применяется термин «числа подобия» (например, число Рейнольдса, число Маха и т. д.).

Сопоставление полученного уравнения с уравнением второго процесса дает

$$\frac{m_U}{m_i m_R} = \frac{m_L}{m_R m_t} = 1.$$

Заменяя масштабы отношениями сходственных параметров, получаем

$$\frac{U_1/U_2}{(i_1/i_2)(R_1/R_2)} = 1, \quad \frac{L_1/L_2}{(R_1/R_2)(t_1/t_2)} = 1,$$

или

$$\pi_1 = \frac{U_1}{i_1 R_1} = \frac{U_2}{i_2 R_2}, \quad \pi_2 = \frac{L_1}{R_1 t_1} = \frac{L_2}{R_2 t_2}.$$

Отношения членов уравнения π_1 и π_2 представляют собой безразмерные комбинации параметров, численно одинаковые для всех подобных процессов, т. е. критерии подобия.

В рассмотренном примере все члены уравнений — однородные функции; это дало возможность вынести масштабы m_U, m_i... в соответствующих степенях за знак функции в виде общего множителя. Если уравнения содержат неоднородные функции (трансцендентные, сложные и т. д.), то аналогичное преобразование невозможно. Если при этом П процессов существует, то аргументы неоднородных функций должны быть равны, являясь также критериями подобия.

Например, для $\varphi_j = K \sin axy$ и $\Phi_j = K \sin AXY$ П процессов требует равенства $axy = AXY = \text{idem}$. Если в аргумент неоднородной функции входит сумма, например $a+x+y$ или $A+X+Y$, то все слагаемые должны быть соответственно одинаковы.

Вторая теорема (π-теорема)

Всякое полное уравнение физического процесса, записанное в определенной системе единиц, может быть представлено зависимостью между критериями подобия, т. е. уравнением, связывающим безразмерные величины, полученные из участвующих в процессе параметров. Связи между Пр и Пс можно представить уравнением

$$f(P_1, P_2, \ldots, P_i \ldots, P_k, \ldots \ldots, P_s, \ldots, P_m) = 0.$$

Если это уравнение учитывает все связи между входящими в него величинами, т. е. является *полной зависимостью*, то оно не может изменяться при любом изменении единиц измерения физических величин. Любое неполное уравнение становится полным, если рассматривать коэффициент пропорциональности как величину, имеющую размерность и изменяющуюся при изменении единиц измерения [7.1, с. 41].

Между единицами величин $P_1, P_2, \ldots, P_m$, входящих в полное уравнение, существует определенная связь. Например, выбрав единицы тока и напряжения, уже нельзя произвольно выбрать единицу, измеряющую сопротивление или мощность. Анализ размерностей показывает, что только k единиц величин $P_1, \ldots, P_m$ являются независимыми, а остальные $m-k$ единиц являются их степенными функциями.

π-теорема на основе теории размерностей позволяет произвести замену переменных, сократив их число с m размерных величин до $m-k$ безразмерных величин, и тем самым перейти к записи уравнения процесса в критериальной форме:

$$f(1, 1, \ldots, 1, \pi_1, \ldots, \pi_{s-k}, \ldots \ldots, \pi_{m-k}) = 0,$$

где $\pi_1, \ldots, \pi_{m-k}$ — критерии подобия:

$$\pi_1 = \frac{P_{k+1}}{P_1^{x_{k+1}} P_2^{y_{k+1}} \ldots P_k^{z_{k+1}}}, \ldots$$

$$\ldots, \pi_{s-k} = \frac{P_s}{P_1^{x_s} P_2^{y_s} \ldots P_k^{z_s}}, \ldots$$

$$\ldots, \pi_{m-k} = \frac{P_m}{P_1^{x_m} P_2^{y_m} \ldots P_k^{z_m}}.$$

При этом упрощается обработка результатов исследований, так как связи между безразмерными критериями подобия π, как правило, выявляются проще, чем связи между обычными именованными величинами.

Существенно, что согласно π-теореме переход к безразмерным соотношениям (связывающим критерии) позволяет распространять результаты конкретного аналитического и экспериментального исследования на ряд подобных явлений. При этом можно находить безразмерные соотношения, не имея математического описания процесса в виде уравнения, а зная только все участвующие в процессе величины и их размерности.

Записанное в критериальной форме уравнение, разрешенное относительно какого-либо критерия подобия (например, π_1), позволяет выразить его как функцию $m-k-1$ критериев подобия:

$$\pi_1 = \Phi(\pi_2, \pi_3, \ldots, \pi_{m-k}).$$

Для того чтобы убедиться в справедливости π-теоремы, обратимся к рассмотренному выше примеру. Существующую связь между Пр i, U, t и Пс R, L можно представить в виде

$$i = f(t, U, R, L).$$

π-теорема дает возможность на основе анализа размерностей параметров определить критерии подобия[1] и представить записанное в общем виде полное уравнение процесса зависимостью между критериями подобия

$$\pi_1 = \frac{U}{iR} = \Phi(\pi_2) = \Phi\left(\frac{L}{Rt}\right).$$

Для данного примера известно решение исходного дифференциального уравнения процесса $i = \frac{U}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$. Преобразовав это решение, получим

$$\pi_1 = \Phi(\pi_2) = \frac{1}{1 - e^{-(1/\pi_2)}}.$$

[1] Процедура определения критериев подобия на основе анализа размерностей (π-теоремы) будет рассмотрена в следующем параграфе.

Последнее уравнение свидетельствует о том, что предсказанная с помощью π-теоремы функциональная связь между критериями подобия действительно существует и раскрывает вид этой связи.

Третья теорема

Эта теорема, формулируя условия, необходимые и достаточные для практической реализации подобия, утверждает: *для подобия явлений должны быть соответственно одинаковыми определяющие критерии подобия и подобными условия однозначности* [7.2].

Определяющие критерии содержат те Пр и Пс, которые в данной задаче можно считать независимыми (время, длина и т. д.). *Условия однозначности* определяют индивидуальные особенности процесса, выделяя из многообразия процессов данного класса конкретный. К ним относятся факторы и условия, не зависящие от механизма самого явления:

а) геометрические свойства системы, в которой протекает процесс;

б) физические параметры среды и тел, образующих систему;

в) начальное состояние системы (начальные условия);

г) условия на границах системы (граничные или краевые условия);

д) взаимодействие объекта и внешней среды.

При анализе переходных процессов к условиям однозначности следует отнести также параметры режима, которые в данной задаче можно полагать неизменяющимися.

В каждом конкретном случае условия однозначности могут быть различны в зависимости от рода решаемой задачи и вида уравнения. Так, для выделения определенного процесса из совокупности процессов, описываемых уравнением

$$iR + L\frac{di}{dt} = U = \text{const},$$

достаточно задать значения Пс R, L, значение неизменяющегося Пр U и начальные условия: $i = i_0$ при $t = t_0$. В задачах, связанных с полным П, однозначность процессов определяется не только начальными условиями, но и свойствами среды, геометрическими свойствами системы и граничными условиями.

Дополнительные положения о подобии

I. *О подобии сложных систем.* Подобие сложных систем, состоящих из нескольких подсистем, соответственно подобных в отдельности, обеспечивается подобием всех сходственных элементов, являющихся общими для подсистем. Общая часть подсистем может при этом рассматриваться как самостоятельная система, число критериев подобия которой может определяться согласно π-теореме, а условия создания подобия — согласно третьей теореме.

Из приведенной формулировки следует, что если в какой-либо системе-модели присоединить натуральные регуляторы, защитные и измерительные приборы и другую аппаратуру, то система-модель, включающая эти устройства, будет подобна системе-оригиналу при сохранении подобными условий их присоединения.

II. *О подобии нелинейных систем.* Все теоремы и условия подобия могут быть распространены на нелинейные системы или системы с переменными параметрами, если выполняются условия совпадения относительных характеристик сходственных параметров, являющихся нелинейными или переменными.

Относительная характеристика, пример которой показан на рис. 7.1, *г*, имеет вид $P_{н*} = \varphi_{0*}(P_{i*})$, где величины со звездочкой — относительные значения, выраженные в долях некоторого характерного — базисного — параметра ($P_б$).

III. *О подобии анизотропных или неоднородных систем.* Условия подобия, справедливые для изотропных систем, которые характеризуются одинаковостью физических свойств (электрическая проводимость, теплопроводность, упругость и т. п.) по всем координатам (x, y, z) внутри данной системы, могут быть распространены и на анизотропные системы, имеющие неодинаковые свойства по различным направлениям. При этом относительные анизотропии в сравниваемых системах должны быть соответственно одинаковы. Условия подобия, справедливые для однородных систем, могут быть распространены и на неоднородные в том или ином смысле системы, если только относительная неоднородность в сравниваемых системах соответственно одинакова.

Подход к установлению условий подобия систем, обладающих неоднородностью или анизотропией, остается в любом случае таким же, как и подход к нелинейным системам.

IV. *О подобии физических явлений при отсутствии геометрического подобия.* В системах, геометрически не подобных, но имеющих нелинейное подобие пространства (подобных, например, аффинно), процессы могут быть физически подобны, имея в сходственных точках пространства подобные изменения параметров процесса.

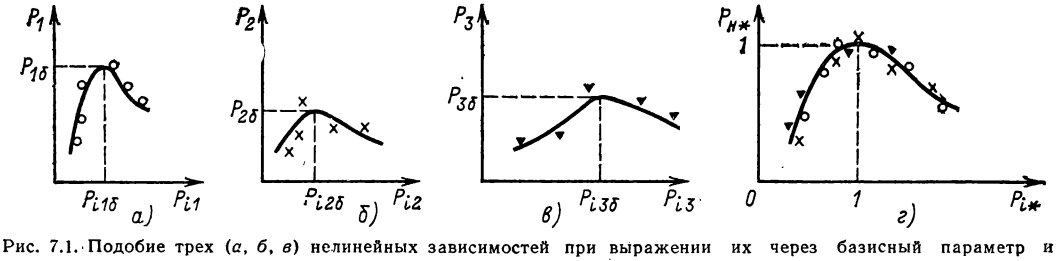


Рис. 7.1. Подобие трех (*а*, *б*, *в*) нелинейных зависимостей при выражении их через базисный параметр и представлении на обобщенной (*г*) характеристике $P_{н*} = \varphi_{0*}(P_{i*})$: $P_{н*} = P/P_б$, $P_{i*} = P_i/P_{iб}$

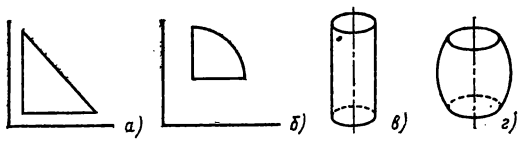


Рис. 7.2. Примеры нелинейного подобия:

а — геометрическая фигура (треугольник); *б* — нелинейно подобный деформированный треугольник; *в* — цилиндр; *г* — нелинейно подобное цилиндру тело

Примеры нелинейного пространственного П приведены на рис. 7.2.

V. *Об условиях подобия при вероятностном характере изучаемых явлений.* Все теоремы и условия подобия, относящиеся к детерминированно заданным системам, справедливы и для стохастически определенных систем при условии совпадения у этих систем плотностей вероятностей сходственных параметров, представленных в виде относительных характеристик. При этом дисперсии и математические ожидания всех параметров (с учетом масштабов) должны быть у подобных систем одинаковыми.

7.3. ТРИ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ

1. Определение критериев подобия путем приведения уравнения к безразмерному виду (способ интегральных аналогов). Уравнение после деления на любой из n его членов приводится к безразмерному виду. Опуская в полученных безразмерных членах уравнения символы дифференцирования и интегрирования, а также исключая из записи имеющиеся неоднородные функции (трансцендентные, сложные, и т. д.), можно полученные таким образом выражения считать критериями подобия (см. первую теорему подобия).

К полученным в результате операции деления $n-1$ основным критериям необходимо присовокупить *а дополнительных* критериев — аргументов входящих в члены уравнения неоднородных функций. Общее число критериев k, найденных способом интегральных аналогов, $k=(n-1)+a$.

Пример. Рассмотрим определение критериев подобия для процесса, происходящего при включении неразветвленной цепи, содержащей сосредоточенные параметры R, L и емкость C, в источник переменного напряжения с амплитудой U и угловой частотой ω. Процесс характеризуется дифференциальным уравнением

$$U \sin \omega t = L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int I\, dt + IR.$$

Разделив все члены уравнения на четвертый член, получим одну из возможных форм записи трех основных критериев подобия

$$\pi_1 = U/IR, \quad \pi_2 = L/Rt, \quad \pi_3 = t/RC,$$

а также дополнительный критерий (гомохронности)

$$\pi_4 = \pi_{\text{Но}} = \omega t.$$

Последний критерий имеет смысл только при условии, что воспроизводится изменение напряжения источника именно по синусоидальному закону.

2. Определение критериев подобия на основе анализа размерностей (π-теоремы). Связи между Пр и Пс представляются уравнением

$$f(P_1, P_2, \ldots, P_i, \ldots, P_k, \ldots \ldots, P_s, \ldots, P_m) = 0,$$

где $1 \leqslant i \leqslant k$, $k+1 \leqslant s \leqslant m$.

Величины, входящие в это уравнение, можно представить в виде произведений их числовых значений $\{P\}$ на единицу $[p]$ данной величины: $P=\{P\}[p]$.

Если в выбранной системе единиц имеется $k=q$ основных единиц, то, обозначая их через $a, b, \ldots, q$, можно записать выражения единиц всех участвующих величин, т. е. их формулы размерностей:

$$[p_1] = [a^{\alpha_1} b^{\beta_1} \ldots q^{\xi_1}];$$
$$[p_2] = [a^{\alpha_2} b^{\beta_2} \ldots q^{\xi_2}];$$
$$[p_i] = [a^{\alpha_i} b^{\beta_i} \ldots q^{\xi_i}];$$
$$[p_k] = [a^{\alpha_k} b^{\beta_k} \ldots q^{\xi_k}];$$
$$[p_s] = [a^{\alpha_s} b^{\beta_s} \ldots q^{\xi_s}];$$
$$[p_m] = [a^{\alpha_m} b^{\beta_m} \ldots q^{\xi_m}],$$

где $\alpha, \beta, \ldots, \xi$ — некоторые числа.

Матрица размерностей всех m параметров имеет вид

$$\mathbf{A} = \begin{Vmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \ldots & \xi_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \ldots & \xi_2 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \alpha_i & \beta_i & \ldots & \xi_i \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \alpha_k & \beta_k & \ldots & \xi_k \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \alpha_s & \beta_s & \ldots & \xi_s \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \alpha_m & \beta_m & \ldots & \xi_m \end{Vmatrix}.$$

Если единицы величин $[p_1], \ldots, [p_k]$ независимы, то формула размерностей любой из этих единиц не может быть представлена как комбинация (полученная посредством умножения или деления) из формул размерностей остальных независимых единиц. При этом для независимости требуется неравенство нулю хотя бы одного определителя D, составленного из показателей степени основных $(1, \ldots, k)$ единиц, входящих в формулы размерностей:

$$D = \begin{vmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \ldots & \xi_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \ldots & \xi_2 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \alpha_i & \beta_i & \ldots & \xi_i \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \alpha_k & \beta_k & \ldots & \xi_k \end{vmatrix}.$$

Порядок определителя D не превышает числа основных единиц (в нашем случае q). Поэтому число независимых единиц k, с помощью которых выражаются значения величин P_i, не может быть больше q. Однако возможны случаи, когда $k<q$. При этом число независимых единиц можно найти, последовательно рассмотрев определители $(q-1)$-го, $(q-2)$-го и т. д. порядков. В общем случае

число независимых единиц равно рангу матрицы размерностей **A**, т. е. наибольшему порядку отличного от нуля определителя, получаемого из этой матрицы при удалении некоторых строк и столбцов.

Если $k=q$ (случай $k<q$ будет разобран ниже на примере), то критерии подобия, определенные на основе анализа размерностей, имеют вид

$$\pi_1 = \frac{P_{k+1}}{P_1^{\alpha_{k+1}} P_2^{\beta_{k+1}} \dots P_k^{\xi_{k+1}}}, \dots$$

$$\dots, \pi_{s-k} = \frac{P_s}{P^{\alpha_s} P_2^{\beta_s} \dots P_k^{\xi_s}}, \dots$$

$$\dots, \pi_{m-k} = \frac{P_m}{P_1^{\alpha_m} P_2^{\beta_m} \dots P_k^{\xi_m}},$$

причем, например, для π_{s-k}

$$\alpha'_s = D_{1s}/D, \ \beta'_s = D_{2s}/D, \ \dots, \ \xi'_s = D_{ks}/D.$$

Значения величин D_{is}, где $i=1, \dots, k$, $s=k+1, \dots, m$, могут быть легко найдены из определителя D после замены в нем i-й строки на строку, составленную из показателей степени α_s, $\beta_s, \dots, \xi_s$ величин $[p_s]_{s=k+1, \dots, m}$.

Таким образом, для определения критериев с помощью π-теоремы необходимо:

1) выявить m параметров $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k, \dots, P_s, \dots, P_m$, которые характеризуют изучаемый процесс;

2) составить матрицу **A** размерностей m параметров;

3) установить число k независимых единиц измерения параметров, равное рангу матрицы **A**;

4) выбрать k параметров $P_1, \dots, P_k$, для которых определитель D отличен от нуля;

5) определить значения показателей степени в выражениях $m-k$ критериев подобия.

Найдем критерии подобия для процесса, протекающего в неразветвленной электрической цепи. Участвующих величин будет семь ($m=7$)

$$P_1 = i, \ P_2 = U, \ P_3 = R, \ P_4 = L,$$

$$P_5 = C, \ P_6 = t, \ P_7 = \omega.$$

Запишем формулы размерностей перечисленных параметров в единицах СИ ($q=4$):

$$[i] = \mathrm{L}^0 \mathrm{M}^0 \mathrm{T}^0 \mathrm{I}^1;$$

$$[U] = \mathrm{L}^2 \mathrm{M}^1 \mathrm{T}^{-3} I^{-1};$$

$$[R] = \mathrm{L}^2 \mathrm{M}^1 \mathrm{T}^{-3} \mathrm{I}^{-2};$$

$$[L] = \mathrm{L}^2 \mathrm{M}^1 T^{-2} \mathrm{I}^{-2};$$

$$[C] = \mathrm{L}^{-2} M^{-1} \mathrm{T}^4 \mathrm{I}^2;$$

$$[t] = L^0 M^0 \mathrm{T}^1 \mathrm{I}^0;$$

$$[\omega] = \mathrm{L}^0 M^0 \mathrm{T}^{-1} \mathrm{I}^0.$$

Полная матрица размерностей **A** размером 7×4 имеет вид

$$\mathbf{A} = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & -3 & -1 \\ 2 & 1 & -3 & -2 \\ 2 & 1 & -2 & -2 \\ -2 & -1 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{Vmatrix}.$$

Все 35 определителей четвертого порядка, составленных из семи строк данной матрицы, равны нулю. Следовательно, ранг матрицы **A** и соответственно число независимых единиц измерения должны быть меньше четырех ($k<q$). Рассмотрим частичную матрицу, составленную из второй, третьей и пятой строк полной матрицы:

$$\begin{Vmatrix} 2 & 1 & -3 & -1 \\ 2 & 1 & -3 & -2 \\ -2 & -1 & 4 & 2 \end{Vmatrix}.$$

Из четырех столбцов этой частичной матрицы можно составить два, не равных нулю определителя третьего порядка. Например, определитель, составленный из второго, третьего и четвертого столбцов,

$$D = \begin{vmatrix} 1 & -3 & -1 \\ 1 & -3 & -2 \\ -1 & 4 & 2 \end{vmatrix} = 1 \neq 0.$$

Следовательно, $k=3$ и число критериев подобия согласно π-теореме равно $m-k=7-3=4$.

Таким образом, параметры U, R и C, которым соответствуют вторая, третья и пятая строки полной матрицы размерностей **A**, можно выбрать в качестве независимых. Соответствующая форма записи критериев подобия имеет вид

$$\pi'_1 = \frac{i}{U^{\alpha'_i} R^{\beta'_i} C^{\xi'_i}}; \ \pi'_2 = \frac{L}{U^{\alpha'_L} R^{\beta'_L} C^{\xi'_L}};$$

$$\pi'_3 = \frac{t}{U^{\alpha'_t} R^{\beta'_t} C^{\xi'_t}}; \ \pi'_4 = \frac{\omega}{U^{\alpha'_\omega} R^{\beta'_\omega} C^{\xi'_\omega}}.$$

Определим значение показателя степени α'_i. Заменяя в определителе D первую строку, соответствующую напряжению U, на последние три элемента первой строки полной матрицы размерностей **A**, соответствующей току i, получим

$$D_{Ui} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & -3 & -2 \\ -1 & 4 & 2 \end{vmatrix} = 1.$$

Отсюда $\alpha'_i = D_{Ui}/D = 1/1 = 1$. Аналогично можно определить значения всех остальных показателей степени

$$\beta'_i = -1; \ \xi'_i = 0, \ \alpha'_L = 0; \ \beta'_L = 2; \ \xi'_L = 1;$$

$$\alpha'_t = 0; \ \beta'_t = 1; \ \xi'_t = 1; \ \alpha'_\omega = 0;$$

$$\beta'_\omega = -1; \ \xi'_\omega = -1.$$

В результате получим окончательные выражения для одной из форм записи критериев подобия процесса, протекающего при включении цепи R, L, C на напряжение $u=U\sin\omega t$:

$$\pi'_1 = iR/U; \ \pi'_2 = L/R^2 C;$$

$$\pi'_3 = t/RC; \ \pi'_4 = \omega RC.$$

Критерии подобия, полученные непосредственно из уравнения (способом интегральных аналогов), в общем случае являются степенными функциями критериев, полученных на базе π-теоремы, и лишь в частном случае

совпадают с последними. Рассмотренный пример позволяет убедиться в этом. Полученные выше способом интегральных аналогов критерии $\pi_1 - \pi_4$ можно выразить через критерии $\pi_1' - \pi_4'$:

$$\pi_1 = U/iR = 1/\pi_1'; \quad \pi_2 = L/Rt = \pi_2'/\pi_3';$$
$$\pi_3 = t/RC = \pi_3'; \quad \pi_4 = \omega t = \pi_3'\pi_4'.$$

3. **Определение критериев подобия применением системы относительных единиц.** Данный способ определения критериев является модификацией первых двух способов. Из основных теорем подобия следует, что, если параметры, характеризующие одно явление P_1', выражены в долях некоторых определенным образом выбранных базисных величин $P_{1б}'$, а для второго явления сходственные параметры P_2' выражены в долях базисных $P_{2б}'$ величин, выбранных таким же образом, то при равенстве относительных значений сходственных параметров $P_* = P_1'/P_{1б}' = P_2'/P_{2б}'$ первое и второе явления могут быть подобны.

Пусть имеется явление, которое описывается в общем виде уравнением $f_1(P_1, P_2, ..., P_k, P_{k+1}, ..., P_s, ..., P_m) = 0$.

Выразим параметры $P_1, ..., P_m$ в относительных единицах, приняв за базисные соответственно $P_{1б}, ..., P_{mб}$. Согласно π-теореме только часть характеризующих явление параметров, а именно k, являются независимыми (величины имеют независимые единицы), остальные же $m - k$ параметров зависимы. Аналогичное утверждение, конечно, справедливо и для базисных величин, поскольку их размерности совпадают с размерностями соответствующих параметров. Поэтому из m базисных величин только k величин, соответствующих независимым параметрам, могут быть выбраны произвольно. Это значит, что *построение системы базисных величин должно отвечать построению той системы единиц, в которой измерены участвующие в явлении величины P, а следовательно, и базисные величины.*

Из сказанного вытекает последовательность определения критериев подобия на основе применения системы относительных единиц:

1) выявление m параметров $P_1, P_2, ..., P_k, P_{k+1}, ..., P_m$, которые характеризуют изучаемый процесс;

2) составление матрицы **A** размерностей m параметров;

3) установление числа k независимых единиц этих параметров, равного рангу матрицы **A**;

4) выбор k независимых базисных величин $P_{1б}, ..., P_{kб}$;

5) определение $m - k$ зависимых базисных величин исследуемого процесса;

6) запись всех m параметров исследуемого процесса в относительных единицах.

Следовательно, только равенства всех параметров, выраженных в относительных единицах, еще не достаточно для того, чтобы имелось подобие явлений. Поэтому *выраженные в относительных единицах параметры становятся критериями подобия только при соблюдении указанных выше дополнительных условий, накладываемых на выбор базисных величин.*

В примере семь участвующих величин (i, U, R, L, C, t, ω) и три независимые единицы измерения ($k=3$). Выражения

$$i_* = i/i_б; \quad U_* = U/U_б;$$
$$R_* = R/R_б; \quad L_* = L/L_б;$$
$$C_* = C/C_б; \quad t_* = t/t_б;$$
$$\omega_* = \omega/\omega_б$$

станут критериями подобия, если построение системы базисных величин ($i_б$, $U_б$, $R_б$, $L_б$, $C_б$, $t_б$, $\omega_б$) будет отвечать построению той системы единиц, в которой измерены участвующие в явлении величины. Выберем в качестве независимых три базисные величины: $U_б$, $R_б$ и $C_б$. Ранее было показано, что

$$[i] = [U]^1[R]^{-1}[C]^0; \quad [L] = [U]^0[R]^2[C]^1;$$
$$[t] = [U]^0[R]^1[C]^1; \quad [\omega] = [U]^0[R]^{-1}[C]^{-1}.$$

Отсюда вытекают условия, накладываемые на выбор зависимых базисных величин:

$$i_б = U_б/R_б, \quad L_б = R_б^2 C_б,$$
$$t_б = R_б C_б; \quad \omega_б = 1/R_б C_б.$$

7.4. ДВЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ДРУГИХ ЯВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

1) *Частная задача* — определение критериев неполного подобия (во времени), т. е. подобия электрических цепей.

2) *Общая задача* — определение критериев полного подобия (во времени и пространстве) электромагнитных полей.

1. Критерии подобия электрических цепей. *1а. Критерии подобия цепей с сосредоточенными постоянными параметрами.* Интегральные аналоги указывают критерии подобия

$$\pi_1 = u/iR; \quad \pi_2 = L/Rt = T_L/t;$$
$$\pi_3 = t/RC = t/T_C,$$

где безразмерные величины $T_L/t = T_{L*}$ и $T_C/t = T_{C*}$ называются *относительными постоянными времени.* Для П процессов в цепях R, L, C необходимо и достаточно обеспечить равенство критериев π_2 и π_3 [согласно π-теореме (см. § 7.2) $\pi_1 = \Phi(\pi_2, \pi_3)$]. Этот вывод в соответствии с первым дополнительным положением (см. § 7.2) распространяется на сколь угодно сложную цепь, если только все отдельные участки этой цепи будут соответственно подобны и соединены друг с другом подобным образом [1]. Если ЭДС меняется по какому-либо заданному закону, то согласно второму дополнительному положению (см. § 7.2) относительные характеристики должны быть соответственно одинаковыми. Это требование, выраженное математически ($U_{1*} = U_{2*} = \text{idem}$), будет дополнительным критерием подобия.

[1] При одинаковых соотношениях между активными сопротивлениями соответствующих ветвей.

Правило: подобие цепей с сосредоточенными постоянными параметрами требует одинаковых критериев подобия — относительных постоянных времени всех элементов; при этом в случае периодически изменяющихся ЭДС дополнительным условием (критерием) будет $\omega t = \text{idem}$. При любом изменении ЭДС их относительные характеристики должны быть соответственно одинаковы.

1б. Критерии подобия цепей, имеющих взаимно индуктивную связь. Рассмотрим простейшую цепь, состоящую из двух контуров, один из которых имеет параметры R_1, L_1 и включается на постоянное напряжение u, а второй короткозамкнут и характеризуется параметрами R_2 и L_2. Взаимная индуктивность между контурами: M_{12}. Для такой цепи уравнение, связывающее критерии подобия, имеет вид [7.1, с. 84]:

$$\pi_1' = u/i_1 R_1 = \Phi\left(\pi_2', \pi_3', \pi_4', \pi_5'\right),$$

где

$$\pi_2' = L_1/R_1 t = T_{L1}/t = T_{L1*};$$

$$\pi_3' = M_{12}/R_1 t = T_{M1}/t = T_{M1*};$$

$$\pi_4' = L_2/R_2 t = T_{L2}/t = T_{L2*};$$

$$\pi_5' = M_{12}/R_2 t = T_{M2}/t = T_{M2*}.$$

— относительные постоянные времени.

Указанные критерии подобия останутся справедливыми и в случае сложной разветвленной цепи, содержащей любое количество взаимных индуктивностей и любое число источников питания.

1в. Подобие цепей с сосредоточенными нелинейными параметрами. Согласно второму дополнительному положению (см. § 7.2) дополнительным условием подобия цепей с нелинейным параметром $P_x = f(P_y)$ будет одинаковость относительных характеристик нелинейного параметра $P_{x*} = \varphi_*(P_{y*})$ или $\varphi_* = \text{idem}$, где $P_{x*} = P_x/P_{бx}$, $P_{y*} = P_y/P_{бy}$, $P_{бx}$ и $P_{бy}$ — характерные значения параметров.

Например, при установлении П цепей, содержащих катушки индуктивности со стальным сердечником, можно оперировать характеристикой $\mu_{a*} = f(H_*)$, где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость, H — напряженность поля.

1г. Критерии подобия цепей с взаимно перемещающимися контурами. Электрические машины: 1) критерий электромагнитных и электрических скоростей $T_* = \text{idem}$ ($T_{L*} = L/Rt = \text{idem}$, $T_{ab*} = M_{ab}/R_a t = \text{idem}$, $T_{ba*} = M_{ab}/R_b t = \text{idem}$);

2) критерий механической скорости $T_{J*} = T_J/t = \text{idem}$ (T_J — постоянная инерции электрической машины);

3) критерий гомохронности $t_* = \text{idem}$ ($\omega t = \text{idem}$).

Из условия 3) следует, что изменять масштаб времени при исследовании процессов, происходящих в машинах переменного тока, можно только одновременно с изменением частоты. Изменять частоту так, чтобы обеспечить одинаковое значение ωt в модели и в оригинале, довольно затруднительно. Однако оказывается возможным получать *приближенное подобие процессов, изменяя масштабы времени с нарушением критерия гомохронности.* Исходя из 2) и 3) $(T_J/t)(1/\omega t) = \text{idem}$. Если при этом $\omega^{м} = \omega^{ор}$ и $T_* = T_k/t = \text{idem}$, где $k = L, ab, ba...$, то получается критерий приближенного электромеханического подобия: $T_J/T_k^2 = \text{idem}$.

1д. Критерии подобия цепей с распределенными параметрами. Для дальних линий электропередач, линий связи и т. п. можно записать [7.1, с. 241]:

$$\pi_1 = \frac{i}{u}\sqrt{\frac{R}{G}} = \varphi(\pi_2, \pi_3, \pi_4),$$

где

$$\pi_2 = L/Rt = T_L/t = T_{L*};$$

$$\pi_3 = C/Gt = T_C/t = T_{C*}; \quad \pi_4 = l\sqrt{RG};$$

R, L, C, G — соответственно сопротивление, индуктивность, емкость и проводимость линии на единицу длины. Критерий π_4 представляет собой дополнительное условие подобия цепей с распределенными параметрами.

2. Критерии подобия электромагнитных полей в однородной изотропной среде. Из уравнений Максвелла для полупроводящей среды получается выражение [7.1, с. 98]:

$$\pi_1 = \frac{E\gamma l}{H} = f_1(\pi_2, \pi_3) = f_1\left(\frac{\mu_a \gamma l^2}{t}, \frac{\varepsilon_a}{\gamma t}\right),$$

где H — напряженность магнитного поля; E — напряженность электрического поля; γ — удельная проводимость среды; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость среды; l — характерный геометрический размер; ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды.

Рассматривая проводящую среду ($\varepsilon_a = 0$) можно в этом выражении исключить критерий π_3:

$$\pi_1 = \frac{E\gamma l}{H} = f_2(\pi_2) = f_2\left(\frac{\mu_a \gamma l^2}{t}\right).$$

П электромагнитного поля в диэлектрике ($\gamma = 0$) лучше устанавливать, используя уравнение

$$\pi_1' = \frac{E\varepsilon_a l}{Ht} = f_3\left(\pi_2', \pi_3', \pi_4'\right) =$$

$$= f_3\left(\frac{\mu_a \varepsilon_a l^2}{t^2}, \frac{\rho l^2}{Ht}, \frac{vt}{l}\right),$$

где ρ — объемная плотность заряда; v — скорость движения зарядов. При отсутствии зарядов ($\rho = 0$, $v = 0$) получим:

$$\pi_1' = \frac{E\varepsilon_a l}{Ht} = f_4\left(\pi_2'\right) = f_4\left(\frac{\mu_a \varepsilon_a l^2}{t^2}\right).$$

Критерии подобия электромагнитных полей, создаваемых периодическими переменными токами частотой $\omega = 2\pi f$, остаются теми же, но их следует дополнить критерием гомохронности $\pi_{Ho} = \omega t$.

Условия подобия в случае неоднородных и анизотропных сред должны устанавливаться в соответствии с третьим и четвертым дополнительными положениями (см. § 7.2). Основные критерии электротехнического П представлены в табл. 7.1. В табл. 7.2 показана связь между

Таблица 7.1

Название критерия	Его выражение
Критерий гомохронности	$[\mathrm{Ho}] = \omega t = \mathrm{idem}$
Основные критерии подобия электромагнитных явлений	$\pi_1 = \dfrac{\mu_a \gamma l^2}{t} = \mathrm{idem}$; $\pi_2 = \dfrac{\varepsilon_a}{\gamma t} = \mathrm{idem}$
Критерии подобия цепей с сосредоточенными или распределенными постоянными (в последнем случае параметры берутся на единицу длины)	$T_{C*} = \dfrac{C}{Gt} = \mathrm{idem}$; $T_{L*} = \dfrac{L}{Rt} = \mathrm{idem}$
Дополнительное условие подобия цепей с распределенными параметрами	$RGl^2 = \mathrm{idem}$
Критерии подобия цепей с взаимной индукцией при разных масштабах токов во взаимосвязанных цепях	$\dfrac{M_{ab}^2}{L_a L_b} = \mathrm{idem}$; $\dfrac{M_{ab}^2}{R_a R_b t^2} = \mathrm{idem}$
Критерии подобия цепей с взаимной индукцией при одинаковом масштабе токов во взаимосвязанных цепях	$T_{ab*} = \dfrac{M_{ab}}{R_a t} = \mathrm{idem}$ $T_{ba*} = \dfrac{M_{ab}}{R_b t} = \mathrm{idem}$
Критерий нелинейного или неоднородного подобия [при нелинейности параметра $P_x = \Phi(P_y)$, где $P_{бx}$, $P_{бy}$ — характерные параметры]	$P_{x*} = \Phi_* (P_{y*})$ или $\Phi_* = \mathrm{idem}$ $P_{x*} = \dfrac{P_x}{P_{бx}}$; $P_{y*} = \dfrac{P_y}{P_{бy}}$
Критерий подобия процессов при нелинейных магнитных материалах (идентичность относительных характеристик). Здесь μ_a — абсолютная магнитная проницаемость, H — напряженность поля.	$\mu_{a*} = \dfrac{\mu_a}{\mu_{ak}} = f\left(\dfrac{H}{H_k}\right) = \mathrm{idem}$ или $\mu_{a*} = f(H_*) = \mathrm{idem}$
Критерий электродинамического подобия	$T_{J*} = \dfrac{T_J}{t} = \mathrm{idem}$
Критерий приближенного электромагнитного и электродинамического подобия	$\dfrac{T_J}{T_k^2} = \mathrm{idem}$

Таблица 7.2

Наименование величины	Уравнение связи	Масштаб подобия и его выражение через независимые масштабы
Магнитодвижущая сила	$F = \int_l H_l \, dl$	$m_F = m_H m_l = m_I$
Электрическое напряжение (разность потенциалов)	$U = \int_l E_l \, dl$	$m_U = m_H m_\gamma^{-1}$
Магнитный поток	$\Phi = \int_S B_n \, dS$	$m_\Phi = m_H m_l^2 m_\mu$
Ток	$I = \int_S J_n \, dS$	$m_I = m_H m_l$
Омическое сопротивление	$R_i = U_i / I_i$	$m_R = m_l^{-1} m_\gamma^{-1}$
Индуктивность (взаимоиндуктивность)	$L_i = \dfrac{1}{I_i} \int_{S_i} B_n \, dS$	$m_L = m_l m_\mu$
Энергия магнитного поля	$W = \int_V \dfrac{HB}{2} \, dV$	$m_W = m_H^2 m_l^3 m_\mu$
Мощность	$P = \dfrac{dW}{dt}$	$m_P = m_H^2 m_l m_\gamma^{-1}$
Электромагнитная сила	$N = \int_V J \times B \, dV$	$m_N = m_H^2 m_l^2 m_\mu$

Примечание. J — плотность тока; S — поверхность; V — объем.

масштабами подобия величин электромагнитного поля и масштабами интегральных величин электрических цепей.

7.5. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА ЕГО РЕЗУЛЬТАТОВ В КРИТЕРИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Четко провести эксперимент, объективно оценить сведения об изучаемом процессе и *распространить материал, полученный в одном исследовании, на серию других исследований*, можно, если правильно их поставить и обработать *(при обобщенном подходе)*.

Критериальная обработка результатов экспериментальных исследований позволяет: а) сократить число необходимых экспериментов за счет уменьшения числа варьируемых факторов; б) распространить результаты каждого из этих экспериментов на неограниченно большой класс подобных процессов.

Критериальная обработка экспериментальных данных при неизвестном математическом описании процесса. Обработка полученных данных должна проводиться в *критериальной форме*, которую покажем на конкретном примере.

Пусть изучается процесс в цепи: активное сопротивление R, индуктивность L и емкость C при включении на источник постоянного напряжения U. Оценим влияние вариаций параметров R, L, C и U в заданных диапазонах на максимальное значение тока в цепи, т. е. изучим зависимость

$$i_{max} = f(R,\ L,\ C,\ U).$$

Критерии подобия процесса определим на основе анализа размерностей (см. § 7.3) параметров i, R, L, C, U. Выбирая в качестве независимых параметры U, R и C, получаем

$$\pi_1 = iR/U;\quad \pi_2 = L/R^2C.$$

При представлении в критериальной форме исследуемая зависимость примет вид

$$\pi_i = \frac{i_{max}R}{U} = \Phi\left(\frac{L}{R^2C}\right).$$

Переход к критериям подобия уменьшает количество варьируемых факторов с четырех (R, L, C, U) до одного (L/R^2C). Это сокращает число опытов, необходимых для экспериментального определения искомой зависимости. Достаточно будет провести 3—4 опыта, варьируя значение безразмерного комплекса π_2 путем изменения значения одного из входящих в него параметров, например R. Полученная кривая позволит оценить влияние на i_{max} не только сопротивления R, но и остальных параметров L, C, U, причем каждая точка этой кривой [например, точка $\pi_i'(\pi_2')$] будет соответствовать бесконечному числу подобных процессов ($\pi_i' = \text{idem}$, $\pi_2' = \text{idem}$).

В рассмотренном выше примере использован способ определения критериев подобия на основе анализа размерностей (π-теоремы). Этот способ позволяет проводить критериальную обработку результатов исследования не только в тех случаях, когда математическое описание процесса известно, но и в случаях, когда описание неизвестно и имеется лишь список участвующих в процессе параметров. При проведении критериальной обработки могут быть использованы и другие способы определения критериев подобия, описанные в § 7.3.

Критериальная обработка результатов исследования при известном математическом описании изучаемого процесса. В уравнения переходного процесса и начальные (граничные) условия входят:

а) Пс и фиксированные значения Пр (начальные значения, граничные значения, значения неизменяющихся параметров режима и т. д.) $P_1, \ldots, P_l$;

б) текущие значения Пр $P_{l+1}, \ldots, P_{l+n}$.

Для приведения математического описания процесса к критериальному виду необходимо [7.3]:

1) составить матрицу размерностей **A** всех участвующих в процессе параметров ($P_1, \ldots, P_l, P_{l+1}, \ldots, P_{l+n}$) и определить ранг $r_A = k$ этой матрицы (см. § 7.3);

2) выбрать в качестве независимых параметров k величин из числа Пс и фиксированных значений Пр $P_1, \ldots, P_k$ ($k \leqslant l$);

3) определить на основе анализа размерностей соответствующую форму записи:

а) безразмерных комплексов, составленных из Пс и фиксированных значений Пр

$$\pi_1 = \frac{P_{k+1}}{P_1^{x_k+1} P_2^{y_k+1} \ldots P_k^{z_k+1}};$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$\pi_{l-k} = \frac{P_l}{P_1^{x_l} P_2^{y_l} \ldots P_k^{z_l}};$$

б) критериев подобия, каждый из которых в числителе содержит текущее значение Пр (в дальнейшем будем называть такие критерии выраженными в относительных единицах параметрами режима):

$$P_{l+1*} = \frac{P_{l+1}}{P_1^{x_l+1} P_2^{y_l+1} \ldots P_k^{z_l+1}};$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$P_{l+n*} = \frac{P_{l+n}}{P_1^{x_l+n} P_2^{y_l+n} \ldots P_k^{z_l+n}}.$$

4) в уравнениях процесса и начальных (граничных) условиях заменить параметры $P_1, \ldots, P_k$ на единицы, параметры $P_{k+1}, \ldots, P_l$ — на безразмерные комплексы $\pi_1, \ldots, \pi_{l-k}$, а текущие значения Пр $P_{l+1}, \ldots, P_{l+n}$ — на выраженные в относительных единицах Пр.

Пример. Приведем к критериальному виду уравнение:

$$L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int i\,dt + Ri = U.$$

В это уравнение входят: а) Пс R, L, C и фиксированное значение Пр U; б) текущие значения Пр i и t. Ранг матрицы размерностей параметров R, L, C, U, i, t равен трем (см. § 7.3). Выберем независимыми Пс R, C и фик-

сированное значение Пр U. Анализ размерностей дает:

$$\pi_1 = \frac{L}{R^2 C^1 U^0} = \frac{L}{R^2 C}$$

и выраженные в относительных единицах Пр

$$i_* = \frac{i}{R^{-1} C^0 U^1} = \frac{iR}{U};$$

$$t_* = \frac{t}{R^1 C^1 U^0} = \frac{t}{RC}.$$

Заменив в исходном уравнении параметры R, C, U на единицы, параметр L на безразмерный комплекс π_1, а текущие значения i, t на выраженные в относительных единицах Пр i_*, t_*, получим уравнение, приведенное к критериальному виду:

$$\pi_1 \frac{di_*}{dt_*} + \int i_* \, dt_* + i_* = 1.$$

Результаты любых расчетов, проводимых по этому уравнению, будут представлены в критериальной форме и справедливы для неограниченно большого класса подобных процессов.

Критериальное планирование эксперимента (КПЭ). Теория планирования эксперимента (см. разд. 5) и теория подобия, способствующие наилучшей организации эксперимента и обработке его результатов, объединяются в настоящее время [7.3].

Пусть требуется изучить зависимость

$$P = \varphi(P_1, \ldots, P_k, P_{k+1}, \ldots, P_l),$$

которая связывает целевую функцию эксперимента P с Пс и фиксированными значениями Пр P_1, ..., P_l. Целевой функцией может являться экстремальное значение Пр, характерное значение Пс (например, предельное значение по условию сохранения устойчивости системы) и т. д.

Для КПЭ необходимо [7.1, § 3-6]:

1) определение вида безразмерных комплексов π_i, выраженных в относительных единицах Пр P_{l+1*}, ..., P_{l+n*}, и критериальной целевой функции π_P; если дифференциальные уравнения процесса известны, следует преобразовать [7.3] эти уравнения и начальные (граничные) условия и привести их к критериальному виду в соответствии с описанным выше способом;

2) определение диапазонов варьирования безразмерных комплексов по заданным интервалам варьирования параметров P_1, ..., P_l;

3) выявление доминирующих безразмерных комплексов π_1, ..., π_m в результате проведения опытов (расчетов) в соответствии с матрицей критериального планирования отсеивающего эксперимента;

4) проведение опытов (расчетов) в соответствии с матрицей критериального планирования активного или пассивного эксперимента с целью определения коэффициентов полинома:

$$\pi_P = d_0 + \sum_{i=1}^{m} d_i \pi_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{m} d_{ij} \pi_i \pi_j + \sum_{i=1}^{m} d_{ii} \pi_i^2 + \ldots$$

Если эксперименты проводятся в реальной системе или на физической модели, в матрицу КПЭ, содержащую в качестве варьируемых факторов безразмерные комплексы, необходимо ввести еще значения варьируемых параметров P_1, ..., P_l.

Полученный в результате проведения минимума опытов (расчетов) полином, связывающий безразмерные комплексы, позволяет не только изучить конкретную зависимость, но и распространить результаты этих опытов на широкий класс процессов, подобных данному. Примеры применения метода КПЭ для решения электроэнергетических задач рассмотрены в [7.1, с. 156—162].

7.6. РЕАЛИЗАЦИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Физическое П может быть осуществлено: 1) при натурном моделировании (Мод), когда в объект, подлежащий исследованию, не вносят изменений и не создают специальных установок (производственный эксперимент; Мод путем обобщения сведений о явлениях или отдельных процессах, происходящих в натуре, и т. д. [7.1]; 2) на специальных моделях (М) и стендах.

Физическая М энергосистемы представляет собой миниатюрную копию физически реальной энергосистемы. Для всякой М энергосистемы всегда четко формулируется круг задач, который будет решаться с помощью данной М. Это выявляет те части энергосистемы, которые должны быть воспроизведены на М с наибольшей полнотой и точностью, требуемыми теорией подобия (условия соблюдения критериев подобия) и практической необходимостью. Например, если физическая М сооружается для изучения переходных процессов, протекающих в электрической части системы, то тепловая и гидравлическая части системы (котлы, паровые турбины, напорные трубопроводы, гидротурбины и т. п.) могут моделироваться приближенно с помощью математических М.

Модели энергосистем, включающие в себя наряду с физически моделированными элементами и математические М отдельных элементов энергосистем, иногда называют *электродинамическими моделями*. Они нашли большое распространение на практике[1].

На электродинамических М проводятся разнообразные работы по следующим основным направлениям:

1) уточнение характеристик систем в целом, например изучение их частотных характеристик, влияния состава нагрузки, поведения регуляторов и т. д.;

[1] При учете влияния стохастических факторов этот полином представляет собой уравнение регрессии.

[1] Краткое описание основных электродинамических М приведено в [7.4, 7.5].

2) проверка теоретических положений и приближений, принимаемых в аналитических методах;

3) проверка, настройка и регулировка устройств и аппаратов нового типа: релейных защит, регуляторов возбуждения, систем автоматического управления (включения резервов и пр.) — в условиях нормальных и аварийных режимов электростанций и электропередач;

4) исследования, направленные на уточнение конструкции и отдельных параметров элементов электропередач, и проверка их работы в системе;

5) контрольные опыты по уточнению пределов устойчивости.

Кроме того, на М осуществляется обучение студентов и тренировка персонала электрических станций и систем.

Порядок исследований при решении задач:

1. Сооружается М, параметры которой устанавливаются такими, чтобы критерии подобия М были соответственно одинаковыми с критериями подобия оригинала (О).

Возможны случаи, когда М специально не сооружается, при этом используются какие-либо подходящие установки, а эксперимент ставится так, чтобы приблизиться к П процесса.

2. Выбираются критерии подобия, для чего предварительно оцениваются параметры, входящие в эти критерии, выясняются наиболее существенные для протекания данного процесса.

3. Выбираются масштабы, при которых учитываются как постановка задачи, так и возможности оборудования.

Неудачный выбор масштабов может привести к тому, что параметры оборудования М будут отличаться от расчетных (скажутся нагревы элементов, приводящие к изменению активных сопротивлений, проявятся нелинейности и т. д.).

Каждому исследованию, проводимому на модели, должна предшествовать тщательная проверка всех параметров модели.

4. Проверяется работа оборудования М по отдельным частям. Только после того, как получена полная уверенность, что все элементы М в отдельности подобны соответствующим элементам О, можно собрать М в целом, соблюдая граничные условия при соединении ее отдельных элементов.

5. Проводятся эксперименты в соответствии с КПЭ (см. § 7.5) и обработка их результатов, содержащая анализ *критериальных зависимостей.*

7.7. РЕАЛИЗАЦИЯ АНАЛОГОВОГО ПОДОБИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Если явления в двух сопоставляемых системах имеют различную физическую природу, но некоторые наиболее интересные для исследователя процессы, происходящие в двух системах, описываются *формально одинаковыми* дифференциальными уравнениями, то можно сказать, что одна система является *прямой моделью-аналогом* другой. *Структурное моделирование* — разновидность аналогового Мод, при которой дифференциальные уравнения, описывающие физический процесс, представляются отдельными элементами М.

В применении прямых моделей-аналогов имеется серьезное ограничение, поскольку не для всех задач можно выявить аналогию и подобрать М. В этом отношении структурные М, поэлементно моделирующие отдельные математические операции, более универсальны и обеспечивают большую точность.

Примером электрических моделей прямой аналогии являются *расчетные модели постоянного тока,* использующие постоянный ток в качестве аналога переменного тока. При этом электрическая схема системы переменного тока воспроизводится с помощью активных сопротивлений, а ЭДС генераторов электростанций — с помощью источников постоянного тока. Более точные *расчетные столы переменного тока* должны частично (для установившегося режима) рассматриваться как физические М, а частично — как аналоги. Они представляют исследуемые схемы комплексными сопротивлениями, учитывая сдвиг фаз между приложенными ЭДС и напряжениями.

Расчет переходного процесса сложной электрической системы представляет значительные трудности и требует для своего выполнения много времени. Стремление упростить эту работу привело, с одной стороны, к автоматизации расчетных столов и созданию *специализированных аналоговых моделей* для расчета электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах (установка «Дельта» и др. [7.6]), а с другой стороны — к широкому использованию для исследования таких процессов *типовых (универсальных) структурных аналоговых моделей* (аналоговые вычислительные машины типов МН-18, АВК-2 и др.).

Особенности обеспечения подобия при Мод на АВМ [7.7, 7.8]:

а) масштабы m_j являются в общем случае размерными величинами и связывают Пр в О с машинными переменными X_j; влияние Пс в О на условия подобия проявляется через значения коэффициентов a_i моделируемой системы уравнений;

б) машинными переменными в АВМ являются напряжения на входах и выходах решающих блоков, и число этих переменных может превышать число уравнений моделируемого процесса, так как между машинными переменными могут существовать некоторые дополнительные зависимости, которые в явном виде отсутствуют в исходных уравнениях;

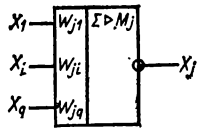
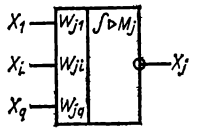
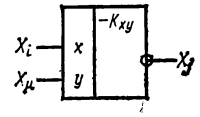
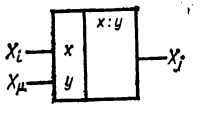
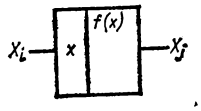
в) условия подобия получаются на основе первой теоремы подобия (см. § 7.2) и связывают коэффициенты a_i с масштабами m_j и коэффициентами передачи решающих блоков; условия подобия для основных типовых решающих блоков приведены в табл. 7.3;

г) при выборе масштабов следует учитывать, что в АВМ рабочий диапазон выходных напряжений обычно составляет ± 100 В, ± 50 В, ± 10 В, при Мод требуется рационально выбрать масштаб времени и масштабы переменных, чтобы наиболее полно использовать диапазон напряжений решающих блоков и тем повысить точность Мод.

Для реализации аналогового П процесса в М процессу в О необходимо:

1) написать дифференциальные уравнения, описывающие процесс;

Таблица 7.3

Название блока	Условное обозначение блока	Формула операции, выполняемой блоком	Машинное уравнение блока	Условие подобия
Суммирующий		$z = \sum_{i=1}^{q} n_i x_i$	$X_j = -\sum_{i=1}^{q} K_{ij} X_i$	$K_{ji} = \frac{m_j a_i}{m_i}$
Интегросуммирующий		$z = \int \sum_{i=1}^{q} a_i x_i \, dt$	$X_j = -\int \sum_{i=1}^{q} K_{ji} X_i \, d\tau$	$K_{ji} = \frac{m_j a_i}{m_i m_t}$
Умножения		$z = x_i x_\mu$	$X_j = KX_i X_\mu$	$m_j = Km_i m_\mu$ $K = \text{const}$ $K = \frac{m_j}{m_i m_\mu}$ $K \neq \text{const}$
Деления		$z = \frac{x_i}{x_\mu}$	$X_j = \frac{X_i}{X_\mu}$	$m_i = m_j m_\mu$
Функционального преобразования		$z = f(x)$	$X_j = m_j f\left(\frac{X_i}{m_i}\right)$	—

Примечание. K — конструктивный коэффициент блока; M_j — коэффициент усиления; $K_{ji} = M_j W_{ji}$ — коэффициент передачи по i-му входу.

2) составить принципиальную схему для решения задачи на М;

3) из табл. 7.3 для каждого решающего блока выписать условия подобия;

4) после вычисления максимальных значений масштабов выходных величин всех блоков по формуле

$$m_{jmax} = \frac{X_{max}}{x_{jmax}},$$

где x_{jmax} — предполагаемое максимальное значение моделируемой переменной, выбрать близкие к максимальным значения m_j и вычислить значения коэффициентов передачи, исходя из условий подобия и значений коэффициентов a_i моделируемой системы уравнений;

5) составить рабочую схему соединения элементов.

После этого надо будет набрать рабочую схему на коммутационном поле АВМ, задать начальные условия, осуществить пуск машины и зарегистрировать получаемое решение с помощью электронно-лучевого индикатора, светолучевого осциллографа и т. п.

7.8. РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ЦИФРОВОГО ПОДОБИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цифровые ЭВМ, моделирующие энергетические процессы, применяются в двух основных направлениях. Первое — это работа *в натуральном времени происходящих процессов.* В этом случае данные для вычислений могут поступать в ЭВМ непосредственно от той системы, работа которой изучается или которой необходимо управлять. Здесь особенно важно быстродействие машины и возможности ввода и вывода информации.

При втором направлении — *решении задач проектирования, планирования и прогнозирования* — нет надобности работать в темпе процесса.

Однако очень большое количество уравнений, отвечающих, например, модели развития большой системы, также требует быстродействия ЭВМ для того, чтобы в обозримые сроки решить поставленные задачи.

ЭВМ не являются моделирующими устройствами какого-либо конкретного процесса в том смысле, какой обычно на основе наших привычных представлений вкладывается в понятие М. Получая данные для анализа, ЭВМ вычисляют какую-либо функцию, перерабатывают, хранят и выдают информацию, создавая формальную модель — алгоритм вычисляемой функции. Алгоритмы, перерабатывающие информацию, должны отвечать следующим требованиям:

1) иметь общность характера, т. е. отражать ход решения не какой-нибудь отдельной задачи, а целого класса обобщенных подобных задач, общность которых выявлена методами теории подобия и запись алгоритмов проведена в *критериях подобия*;

2) обладать четкостью и однозначностью указаний по проведению операций на каждом этапе их выполнения;

3) при любой исходной информации и точном соблюдении распоряжений, определяющих вычислительный процесс, должны непосредственно и наиболее быстро (по сравнению с другими возможными алгоритмами) приводить к решению, выдаваемому в удобной для использования форме, т. е. должны обладать результативностью;

4) должны выдавать окончательный результат в виде обобщенных зависимостей (соотношений, графиков), позволяющих распространить результаты на группы явлений, подобных данным.

При соблюдении указанных условий автоматическая ЭВМ вместе с соответствующим алгоритмом может рассматриваться как М изучаемого процесса, обеспечивающая решение научных и технических задач.

Современную энергетику все больше и больше начинают интересовать решения, использующие не только математические М, алгоритм которых предусматривает жесткий программный ход, как это делается в большинстве случаев при применении ЭВМ, но и М, которые позволили бы подходить к задаче как к эрготической, предусматривающей вмешательство человека-оператора в процесс исследования или управления, что равносильно расширению алгоритма и переходу к более высокому классу задач. При реализации эрготического Мод требуются изменения в подходах к программированию и в сочетаниях комплексов цифровой и вычислительной техники. Отсюда появляются новые М — *гибридные модели*, сочетающие цифровые ЭВМ и АВМ [7.6].

Развитие систем управления электроэнергетикой требует широкого использования М, как математических и аналоговых, так и физических. Для решения задач, связанных с управлением стационарными и переходными режимами энергосистемы в натуральном времени, объединяют эти М в универсальный *цифро-аналого-физический комплекс*, состоящий из электродинамической М, управляющей ЭВМ и устройств управления комплексом. Такой моделирующий комплекс представляет большие возможности для испытания различных алгоритмов управления и для выработки требований к ЭВМ, измерительным и управляющим органам по быстродействию и оперативной памяти.

7.9. ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Требования различны в зависимости от поставленных задач и характера исследований. Исследования, касающиеся проектных разработок, а также оценки и относительного сопоставления вариантов, не требуют высокой точности результатов. Однако точность результатов имеет весьма большое значение, если исследования проводятся применительно к конкретной схеме, а полученные результаты необходимо распространить на О.

При получении на основе Мод характеристик тех или иных явлений необходимо учитывать факторы, обусловливающие расхождение результатов, получаемых в М и в О. К этим факторам относятся неточности, обусловленные:

1) определением или заданием параметров О, входящих в критерии подобия, и воспроизведением параметров на М; этого вида неточности можно свести к некоторым суммарным неточностям воспроизведения критериев подобия;

2) погрешности измерений при проведении опытов; погрешности могут быть уменьшены многократным повторением измерений, выбором приборов надлежащей точности;

3) неполным учетом в М факторов, заведомо влияющих на главные процессы, т. е. осуществлением приближенного Мод вместо точного.

Так, изображая на М короткое замыкание, приходится считаться с тем, что сопротивление дуги в месте короткого замыкания, являясь случайной величиной, может отличаться от расчетного значения. На аварию, воспроизводимую на М, в действительной системе может влиять также и характер погоды (дуга, коронирование проводов). Непостоянство случайно изменяющихся параметров, входящих в критерии подобия, приводит к тому, что критерии подобия также оказываются подверженными случайным вариациям. Поэтому при оценке достоверности результатов Мод систем, имеющих такие параметры, необходимо учитывать влияние случайных факторов.

При оценке точности результатов экспериментальных исследований реальной системы, опытов на физической М, процедуры Мод на АВМ и численного решения системы уравнений, описывающих исследуемый процесс, необходим различный подход. В первом случае (натура) речь идет о конкретном сложном явлении, во втором (модель) — о физическом воспроизведении определенных сторон явления на основе теории подобия стохастически определенных систем, моделируемых в соответствии с пятым дополнительным положением (см. § 7.2), в третьем (АВМ) о воспроизведении математических закономерностей, отраженных в уравнениях описываемого процесса, в четвертом (цифровая ЭВМ) — о численной интерпретации этих закономерностей.

Обычно в практических приложениях оценка достоверности результатов Мод с учетом погрешностей задания и воспроизведения критериев подобия сводится к двум задачам: а) оценка влияния стохастических вариаций

критериев подобия; б) оценка погрешности реализации приближенного Мод вместо точного.

Оценка погрешностей Мод, связанных с неточностью воспроизведения критериев подобия, требует изучения характера связи между исследуемым процессом и количественными отклонениями критериев подобия, представляемой в виде уравнения регрессии. Его получают на основе применения метода КПЭ, который дает возможность в результате проведения минимума расчетов и экспериментов выявить доминирующие критерии подобия (см. § 7.5). Полученная информация позволяет объективно решить вопрос о необходимой точности воспроизведения критериев подобия, соответствующей степени их влияния на исследуемый процесс [7.1, с. 306].

Приближенное моделирование. Погрешности, вызванные применением приближенного Мод, выявляются двумя корректирующими друг друга путями. Первый путь — проверка опытом на основе *последовательного моделирования*. Моделируя одну и ту же систему в разных масштабах, при разных коэффициентах линеаризации и т. п., можно получить представление о возможном искажающем эффекте М и о точности расчетных представлений.

Второй путь — исследование уравнений, положенных в основу приближенных критериев подобия, и проведение серий опытов и расчетов с разным сочетанием величин, входящих в приближенные критерии [7.1, с. 310].

Например, опыты по определению изменения угла δ при трехфазном коротком замыкании в начале ненагруженной линии $Л$ (рис. 7.3), проводимые на основе приближенного критерия $\pi_1 = T_J/T_{d0}^2 = \text{idem}$ (см. § 7.4), повторяются при разных значениях T_J и T_{d0}, которые сочетаются так, что критерий π_1 удовлетворяется. Одновременно в соответствии с методом КПЭ изменяют другие критерии подобия. В данном случае можно изменять критерий $\pi_2 = x_г/R_г$ и критерий $\pi_3 = (x_{т1}+x_0)/x_г$, характеризующий электрическую удаленность короткого замыкания от шин синхронного генератора $Г$ (рис. 7.3). При этом необходимо обеспечить неизменность значений остальных критериев подобия ($t_{откл}/T_{d0} = \text{idem}$ и т. д.).

Уравнение регрессии, связывающее погрешность в определении максимального угла $\Delta\delta_{max}$ со значениями варьируемых критериев подобия, для рассматриваемого примера имеет вид:

$$\Delta\delta_{max} = b_0 + \sum_{i=1}^{3} b_i \bar{\pi}_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{3} b_{ij} \bar{\pi}_i \bar{\pi}_j + \ldots,$$

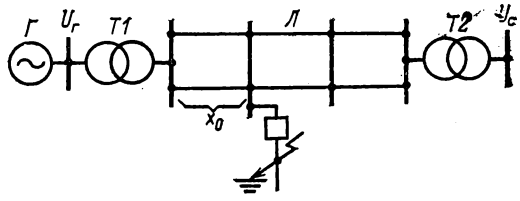


Рис. 7.3. Схема электрической системы

где $\bar{\pi}_i$, $\bar{\pi}_j$ — кодированные [7.1, с. 133] значения критериев. Полученное уравнение показывает степень влияния каждого критерия подобия на величину $\Delta\delta_{max}$ и позволяет установить зоны заметной погрешности. Эти зоны необходимо исключить (считать «запретными») при Мод.

Принятые сокращения и обозначения

П — подобие
О — оригинал
М — модель
Мод — моделирование
Пс — параметр системы
Пр — параметр режима
КПЭ — критериальное планирование эксперимента
idem — соответственно одинаково
$P_1, \ldots, P_m$ — параметры
$\alpha_i, \beta_i, \ldots, \xi_i$ — показатели размерности
$\pi_1, \ldots, \pi_k$ — критерии подобия
x_i, y_i, z_i — координаты, показатели степени

Список литературы

7.1. **Веников В. А., Веников Г. В.** Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). М.: Высшая школа, 1984. 440 с.

7.2. **Кирпичев М. В.** Теория подобия. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 94 с.

7.3. **Веников В. А., Сыромятников С. Ю.** Развитие основных положений теории подобия (уточнение условий создания моделей на основе третьей теоремы). — Электронное моделирование, 1983, № 1, с. 3—11.

7.4. **Веников В. А., Иванов-Смоленский А. В.** Физическое моделирование электрических систем. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1956. 359 с.

7.5. **Теория** подобия и физическое моделирование. — Тр. МЭИ, вып. 77. М.: МЭИ, 1970. 220 с.

7.6. **Бушуев В. В.** Аналого-цифровое моделирование электроэнергетических объектов. М.: Энергия, 1980. 168 с.

7.7. **Тетельбаум И. М., Тетельбаум Я. И.** Модели прямой аналогии. М.: Наука, Главная редакция физико-математической лит., 1979. 384 с.

7.8. **Разоренов Г. И.** Выбор масштабов при моделировании. М.: Советское радио, 1973. 160 с.

Раздел 8

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

СОДЕРЖАНИЕ

8.1. Основные направления применения ЭВМ в электротехнике и электроэнергетике . 234
Процесс проектирования и его основные этапы (234). Направления и формы применения ЭВМ в проектировании (234). Особенности современного этапа применения ЭВМ в проектировании (235). Цели создания, структура, состав и назначение основных компонентов САПР (235).
8.2. Техническое обеспечение автоматизированного проектирования 237
Основные компоненты технического обеспечения (237). ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ как основа технического обеспечения САПР (237). Специализированные технические средства САПР (239). Автоматизированные рабочие места проектировщиков (АРМ) (239). Структура комплекса вычислительных средств САПР, режимы его работы и применения (240).
8.3. Математические модели и алгоритмы анализа электротехнических и электроэнергетических объектов 241
Математические модели электрических цепей (241). Особенности машинного расчета частотных и временных характеристик электрических цепей (242). Расчет чувствительности и устойчивости электрических цепей (243). Модели и алгоритмы анализа электромеханического преобразования энергии, тепловых и деформационных процессов в электромеханических устройствах (245). Алгоритмы вероятностного анализа рабочих показателей электротехнических и электроэнергетических объектов (246).
8.4. Методы и алгоритмы оптимизации проектных решений 247
Основные понятия и постановка задачи оптимизации (247). Многокритериальная оптимизация (248). Методы и алгоритмы поисковой оптимизации (248). Задачи оптимального проектирования электрических цепей (250).
8.5. Организация программного обеспечения САПР 253
Структура программного обеспечения (253). Пакеты прикладных программ схемотехнического проектирования электрических цепей (254).
8.6. Системы автоматизированного проектирования электроснабжения как человеко-машинные системы 255
Основные сведения (255). Технологическая схема проектирования системы электроснабжения промышленного предприятия и применение ЭВМ при решении задач проектирования (255). Технологическая схема непрерывного проектирования развития предприятий электрических сетей, применение ЭВМ при решении задач проектирования (257). Описание программных комплексов, применяемых в автоматизированном проектировании (258).
Список литературы 259

8.1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЭВМ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Процесс проектирования и его основные этапы

Проектирование является процессом постепенного перехода от постановки проблемных вопросов в терминах технического задания (ТЗ) к созданию подробной модели объекта проектирования, зафиксированной в форме технической документации, которая позволяет организовать производство и правильно эксплуатировать спроектированные объекты. В проектировании технических объектов наибольшее распространение получил блочно-иерархический подход, в соответствии с которым весь процесс разделяется на ряд этапов: анализ и уточнение ТЗ, предварительное проектирование, эскизный, технический и рабочий проекты (см. § 10.1).

Общей особенностью ведения проектных работ при блочно-иерархическом подходе является их итерационный характер, что объясняется неполным описанием объекта на этапах проектирования. По мере детализации этого описания может оказаться, что принятые ранее проектные решения неприемлемы. Степень формализации решаемых задач повышается от этапа к этапу, одновременно возрастает и трудоемкость выполнения проектных работ. Напротив, на начальных этапах принятие проектных решений затруднено из-за неполноты информации. Поэтому здесь находят применение эвристические или полуэвристические методы проектирования, базирующиеся на опыте предшествующих разработок, а также на патентных технических решениях.

Основными процедурами, выполняемыми на каждом этапе проектирования, являются: синтез вариантов проекта; построение модели объекта проектирования; анализ варианта проекта с помощью полученной модели; принятие проектного решения по результатам анализа.

Синтез предполагает конкретизацию принимаемых по каждому элементу объекта технических решений. Каждый рассматриваемый вариант проекта требует создания модели или ее настройки на условия применения. Процедура принятия проектного решения имеет смысл только при наличии ряда альтернативных вариантов проекта. Поэтому указанная последовательность процедур выполняется многократно на каждом этапе проектирования.

Направления и формы применения ЭВМ в проектировании

Вычислительная техника находит применение в проектировании практически с момента своего создания. Можно выделить следующие направления применения ЭВМ в проектировании.

1. С помощью ЭВМ решаются трудоемкие расчетные задачи анализа переходных и установившихся процессов, характеризующих преобразование энергии или информации в объектах проектирования. Применение ЭВМ позволяет увеличить число учитываемых параметров, использовать более точные математи-

ческие модели. Многократно сокращается время решения задач в сравнении с неавтоматизированным выполнением расчетов.

2. Автоматизация оптимизационных расчетов. Наибольшее применение получили методы и алгоритмы математического программирования. ЭВМ в данном случае используются для формирования различных вариантов проекта и выбора лучшего варианта в соответствии с принятым критерием. Проектировщик здесь не только освобождается от рутинной расчетной работы, но и от необходимости выполнять логические операции по поиску лучших вариантов проекта.

3. Решение на ЭВМ трудноформализуемых задач проектирования в диалоговом режиме. В данном случае ЭВМ выполняет рутинные операции по преобразованию информации, а проектировщик синтезирует проектные решения, оценивает полученные результаты и выбирает пути продолжения проектных работ. Развитие этого направления стало возможным благодаря совершенствованию средств программного и технического обеспечения ЭВМ.

4. Применение ЭВМ для обработки графической информации. Работы с графической информацией занимают весьма важное место в проектировании электротехнических и электроэнергетических объектов. Например, более 75 % проектной документации для объектов электротехнической промышленности в настоящее время представляется в графической форме. В составе современных ЭВМ имеется ряд периферийных устройств, предназначенных для обработки графической информации: устройства ввода графической информации, графические дисплеи, чертежные автоматы, комплексы этих устройств на основе мини-ЭВМ.

5. Использование ЭВМ непосредственно в контуре управления и обработки результатов при испытаниях макетных и опытных образцов проектируемых объектов. Для реализации этого направления разрабатываются устройства сопряжения испытуемых объектов с ЭВМ. В настоящее время наибольшее распространение получили технические средства автоматизации испытаний, выполненные в международном стандарте КАМАК.

Особенности современного этапа применения ЭВМ в проектировании

Выделение указанных выше направлений применения ЭВМ в проектировании достаточно условно. Развитие возможностей ЭВМ оказывает существенное влияние на традиционные сферы их применения. Так, возможности диалогового взаимодействия проектировщика с ЭВМ позволяют в ряде случаев существенно упростить алгоритмы оптимизационных расчетов, а способность ЭВМ обрабатывать графическую информацию облегчает подготовку данных для программ анализа физических процессов в объектах проектирования.

В современных условиях наблюдаются стирание граней между представленными направлениями и их комплексное применение на различных этапах проектирования. Рассматриваемый этап использования ЭВМ в проектировании характеризуется:

развитым состоянием используемых математических моделей и алгоритмов анализа объектов проектирования;

комплексным подходом к оптимизации проектных решений на взаимосвязанных этапах разработок;

организацией автоматизированного информационного обеспечения проектирования;

широким применением технических и программных средств обработки графической информации, использованием ЭВМ для выпуска текстовой и графической документации;

интеграцией автоматизированного проектирования с процессами производства и испытаний продукции на основе ЭВМ.

Предпосылками комплексной автоматизации проектирования являются:

1. Низкий уровень производительности труда в проектировании, обусловливающий несоответствие между постоянным усложнением и увеличением количества объектов и задач проектирования и применяемыми традиционными методами и средствами ведения проектных работ. Поэтому происходит увеличение сроков проектирования и затрат на его проведение, снижение качества и эффективности проектных работ, что в итоге приводит к быстрому моральному старению новой техники.

2. Развитие функциональных возможностей современных и перспективных средств вычислительной техники, которые позволяют накапливать и хранить значительные объемы информации, чрезвычайно быстро вести ее поиск и обработку, выдавать результаты проектирования в удобной для проектировщика форме, использовать диалоговые способы решения проектных задач.

3. Накопленный опыт применения ЭВМ для решения частных задач проектирования, концентрируемый в значительном количестве алгоритмов и программ анализа физических процессов в объектах проектирования, параметрической оптимизации, имитационного моделирования с учетом технологических и эксплуатационных факторов и др.

4. Повышение эффекта от применения математических методов и ЭВМ по мере расширения их внедрения в проектирование. Здесь важно не только количественное увеличение числа задач, решаемых с помощью ЭВМ, но и обеспечение взаимосвязей этапов проектирования по уровню точности и достоверности результатов, информационной совместимости, определение эффективных форм организации вычислительных работ и пр.

Цели создания, структура, состав и назначение основных компонентов САПР

Кардинальное повышение эффективности применения ЭВМ в проектировании связывается с созданием систем автоматизированного проектирования (САПР). Такие системы создаются с целью: повышения качества и технико-экономического уровня проектируемых объектов; уменьшения затрат на создание и эксплуатацию объектов; сокращения сроков проектирования; улучшения условий труда проектировщиков.

Достижение целей создания САПР обеспечивается: систематизацией и совершенство-

ванием процессов проектирования на основе применения математических методов и средств вычислительной техники; комплексной автоматизацией работ в проектных организациях с перестройкой их структуры и кадрового состава; повышением качества управления проектированием; применением эффективных математических моделей проектируемых объектов; использованием методов оптимизации; частичной заменой макетирования и натурных испытаний математическим моделированием.

Таким образом, САПР можно определить как организационно-техническую систему, включающую средства программного и информационного обеспечения на основе ЭВМ и математических методов, взаимосвязанных с подразделениями проектной организации, служащую для автоматизированного выполнения работ на всех этапах проектирования, повышающую его уровень и качество с одновременным сокращением затрат и сроков проведения.

При создании и последующем развитии САПР должны применяться следующие основные общесистемные принципы.

1. Принцип включения, предусматривающий, что требования к созданию, функционированию и развитию САПР определяются со стороны более сложной системы — отрасли и (или) проектной организации, включающей в себя САПР.

2. Принцип информационного единства, определяющий, что в САПР должны использоваться термины, символы, условные обозначения, языки описания объектов и способы представления информации, установленные в отрасли соответствующими нормативными документами.

3. Принцип комплексности, требующий, чтобы в САПР обеспечивалась связанность проектирования отдельных элементов и объекта в целом на всех этапах проектирования.

4. Принцип системного единства, заключающийся в том, что на всех стадиях создания, функционирования и развития САПР целостность системы должна обеспечиваться связями между отдельными подсистемами.

5. Принцип совместимости, означающий, что языки, коды, информационные и технические характеристики структурных связей между подсистемами, должны быть согласованы так, чтобы обеспечивалось совместное функционирование всех подсистем и сохранялась возможность развития структуры.

6. Принцип развития, требующий, чтобы САПР разрабатывалась и функционировала как развивающаяся система; для этого в САПР должна предусматриваться возможность наращивания и совершенствования компонентов и связей между ними.

7. Принцип инвариантности, предопределяющий, что подсистемы и компоненты САПР должны быть по возможности универсальными или типовыми, т. е. инвариантными к объекту проектирования.

Комплекс средств автоматизированного проектирования состоит из совокупности средств методического, программного, информационного, технического и организационного обеспечений.

Компонентами методического обеспечения (МО) САПР являются документы, в которых изложены теория, методы, способы, математические модели, алгоритмы, специальные алгоритмические языки для описания объектов, терминология, нормативы, стандарты и другие данные, обеспечивающие методику проектирования на всех этапах. Методическое обеспечение может быть условно разделено на математическое и лингвистическое.

Программное обеспечение (ПО) САПР включает документы с текстами программ, реализующие как проектные процедуры, так и операции по управлению проектным процессом и техническими средствами САПР, собственно программы на машинных носителях и эксплуатационные документы, обеспечивающие их функционирование. ПО САПР подразделяется на общесистемное и прикладное (или проблемное). Общесистемное ПО САПР составляют те программы или программные системы, которые входят в состав программного обеспечения современных ЭВМ. Компонентами общесистемного ПО являются, например, операционные системы, трансляторы с алгоритмических языков программирования и др. Прикладное ПО САПР составляют отдельные программы и пакеты прикладных программ, предназначенные для получения проектных решений.

Компонентами информационного обеспечения (ИО) САПР являются документы с описанием ранее выполненных проектов, типовых проектных решений, типовых элементов, комплектующих изделий, материалов и других справочно-нормативных данных, а также записи этих данных на машинных носителях. Совокупность компонентов информационного обеспечения образует информационную базу (или базу данных) САПР.

Техническое обеспечение (ТО) САПР составляют устройства вычислительной и организационной техники, средства передачи данных, измерительные и другие устройства или их сочетания, обеспечивающие функционирование САПР.

Компонентами организационного обеспечения (ОО) САПР являются методические и руководящие материалы, положения, инструкции, приказы, штатные расписания, квалификационные требования и другие документы, обеспечивающие взаимодействие подразделений проектной организации и регламентирующие деятельность специалистов при создании, эксплуатации и развитии САПР.

Основными структурными звеньями САПР являются функциональные подсистемы, объединяющие средства обеспечения, необходимые для получения проектных решений и соответствующих им проектных документов. Различают объектно-ориентированные (объектные) и объектно-независимые (инвариантные) подсистемы САПР.

Объектные подсистемы осуществляют проектирование на определенном этапе или решают определенный круг задач на различных этапах. Например, к числу объектных могут быть отнесены подсистемы конструирования, оптимизационных расчетов, анализа физических процессов в объектах, выпуска проектно-конструкторской документации.

Инвариантные подсистемы осуществляют функции управления и обработки информации в САПР, не зависящие от особенностей проек-

тируемых объектов. Инвариантными могут быть, например, подсистемы управления САПР, численного анализа, диалоговых процедур, информационно-поисковых процедур, ввода, обработки и вывода графической информации.

8.2. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Основные компоненты технического обеспечения

В число основных компонентов технического обеспечения САПР включаются:

ЭВМ со стандартным комплектом периферийных устройств (устройства подготовки данных на машинных носителях, устройства ввода-вывода информации);

. устройства, расширяющие функциональные возможности ЭВМ (например, расширители оперативной и внешней памяти, средства специальной арифметики, т. е. устройства, расширяющие те функции основных устройств ЭВМ, которые необходимы САПР);

устройства связи различных ЭВМ, объединенных в комплекс вычислительных средств САПР;

специализированные периферийные устройства, необходимые для функционирования САПР и обеспечения непосредственной связи проектировщиков с ЭВМ (кодировщики графической информации, чертежные автоматы, графические дисплеи);

средства удаленной передачи данных, использующие для связи с ЭВМ обычные телефонные и телеграфные каналы;

средства организационной техники (неавтоматизированные картотеки, средства для размножения документации, средства хранения и поиска информации на микрофильмах и микрофишах).

ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ как основа технического обеспечения САПР

Современные ЭВМ условно разделяют на классы. Большие ЭВМ обладают оперативной памятью более 512 Кбайт и быстродействием свыше $300 \cdot 10^3$ операций в секунду. Средние ЭВМ имеют оперативную память в пределах 128—256 Кбайт, а быстродействие $(100—200) \cdot 10^3$ операций в секунду.

Характеристиками, весьма близкими к предыдущему классу, обладают мини-ЭВМ: объем оперативной памяти — 32—128 Кбайт, быстродействие — до $300 \cdot 10^3$ операций в секунду.

К четвертому классу относят микро-ЭВМ, лучшие образцы которых имеют следующие данные: оперативная память — 32—128 Кбайт; быстродействие — $(100—200) \cdot 10^3$ операций в секунду.

Современные САПР строятся на основе универсальных программно-управляемых ЭВМ третьего поколения. Широко используются вычислительные машины Единой системы (ЕС ЭВМ) и машины Системы мини-ЭВМ (СМ ЭВМ), производимые странами социалистического содружества.

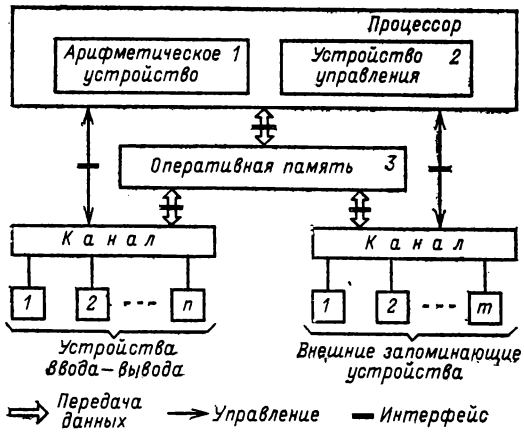


Рис. 8.1. Структурная схема ЕС ЭВМ

ЕС ЭВМ строятся с использованием микроэлектронной элементной базы и обладают всеми особенностями ЭВМ третьего поколения: программной совместимостью моделей ЭВМ, входящих в состав системы, модульной структурой построения ЭВМ, конструкцией со стандартной системой сопряжения, широким набором периферийных устройств различного назначения, развитой системой программного обеспечения.

Основными функциональными устройствами ЭВМ являются процессор, оперативная память и каналы ввода-вывода. Процессор выполняет арифметические и логические операции, а также управляет последовательностью выполнения операций. Оперативная память служит для хранения программы и данных, непосредственно используемых в работе программы. Каналы ввода-вывода представляют собой специализированные устройства, обеспечивающие процесс обмена информацией между периферийными устройствами и оперативной памятью. Выделение каналов как специализированных процессоров ввода-вывода позволяет совмещать во времени операции обработки информации центральным процессором и обмена с внешней средой.

Упрощенная структурная схема ЕС ЭВМ показана на рис. 8.1. Сопряжение отдельных устройств ЭВМ осуществляется посредством специальных устройств связи — интерфейсов, которые обеспечивают информационное, электрическое и механическое сопряжения. Типизация модулей, входящих в состав ЭВМ, и средств интерфейса позволяет изменять конфигурацию вычислительной установки. В частности, имеется возможность формировать многопроцессорные установки или выбирать процессор необходимой производительности, изменять объем оперативной памяти, число каналов и состав периферийных устройств.

Основные данные выпускаемых моделей ЕС ЭВМ приведены в табл. 8.1.

Машины ЕС ЭВМ имеют развитый стандартный набор следующих периферийных устройств различного назначения:

1. Накопители на магнитной ленте (НМЛ) предназначены для использования в качестве устройств внешней памяти с последовательным доступом к информации. В составе ЕС ЭВМ имеется несколько подобных устройств:

Таблица 8.1. **Технические характеристики ЕС ЭВМ**

Модель ЭВМ	Быстродействие, 10^3 операций/с	Максимальный объем оперативной памяти, Кбайт	Цикл обращения к оперативной памяти, мкс	Минимальное число внешних запоминающих устройств	
				НМД	НМЛ
ЕС-1022	80—90	512	2,0	2	4
ЕС-1033	200	512	2,0	2	4
ЕС-1040	400	1024	1,0	6	8
ЕС-1045	500	3072	1,0	—	—
ЕС-1060	1500	8192	2,0	10	8
ЕС-1065	4500	16 324	0,8	—	—

ЕС-5010-01 и ЕС-5017 емкостью 25 Мбайт каждое, ЕС-2025 емкостью 50 Мбайт. Скорость передачи данных для различных типов устройств составляет от 16 до 156 Кбайт в секунду. Подключение НМЛ к каналам ввода-вывода ЭВМ осуществляется при помощи устройства управления (ЕС-5511, ЕС-5517, ЕС-5525).

2. Накопители на сменных магнитных дисках (НМД) используются как устройства внешней памяти с прямым доступом. Сменные пакеты дисков устройств ЕС-5050 и ЕС-5056 имеют емкость 7,25 Мбайт, ЕС-5061—29 Мбайт, ЕС-5066 — 100 Мбайт. Среднее время доступа к информации для различных типов НМД — от 40 до 90 мс. Скорость обмена данными составляет 30—100 Кбайт/с. Для подключения НМД к каналам ЭВМ используются устройства управления ЕС-5551 и ЕС-5566.

3. Устройства ввода с перфокарт (ЕС-6012, ЕС-6019) и перфолент (ЕС-6022) и устройства вывода на перфокарты (ЕС-7010) и перфоленты (ЕС-7022) предназначены для считывания информации, перенесенной соответственно на перфокарты или перфоленты, преобразования ее в электрические сигналы, передачи их в ЭВМ и выполнения указанных операций в обратной последовательности. Скорость ввода — до 1200 перфокарт в минуту или 1500 строк перфоленты в секунду. Скорость вывода — 100 перфокарт в минуту или 150 строк в секунду.

4. Печатающие устройства ЕС-7032 и ЕС-7037 предназначены для преобразования выводимой из ЭВМ алфавитно-цифровой информации в виде электрических сигналов в систему печатных знаков, фиксируемых на бумагу. Скорость печати составляет 750—1200 строк в минуту, количество символов — от 120 до 160.

5. Устройство группового управления с выносными пультами ЕС-7906 представляет собой систему алфавитно-цифровых дисплеев ЕС-7066 как простейших терминалов, подключенных к общему устройству управления ЕС-7566 и предназначенных для ввода-вывода алфавитно-цифровой информации на экран электронно-лучевой трубки. К устройству управления можно подключить до 16 выносных пультов ЕС-7066. Максимальное удаление дисплея от устройства управления — 600 м, максимальное число знаков, одновременно воспроизводимых на экране, — 960, количество знаков в строке — 80 или 40.

Таблица 8.2. **Технические характеристики СМ ЭВМ**

Модель ЭВМ	Быстродействие, 10^3 операций/с	Объем оперативной памяти, Кслов	Цикл обращения к оперативной памяти, мкс
СМ-1	400	64	1,2
СМ-2	500	256	1,0
СМ-3	200	32	1,2
СМ-4	500	128	1,2
СМ-5*	1000	256	0,9

* Находится в стадии разработки.

Развитие возможностей мини-ЭВМ способствует их широкому использованию в САПР. Технические характеристики СМ ЭВМ представлены в табл. 8.2.

Агрегатно-модульный принцип построения СМ ЭВМ позволяет создать комплексы различной конфигурации с разнообразным составом технических средств. Схема построения управляющих вычислительных комплексов (УВК) СМ-3, СМ-4 характеризуется наличием общей магистрали ввода-вывода и хранения информации (общей шины), к которой подключаются все устройства, входящие в состав ЭВМ (рис. 8.2). Структура моделей СМ-1 и СМ-2 содержит две магистральные шины: оперативных запоминающих устройств и ввода-вывода.

УВК СМ-3 имеет в своем составе следующий набор устройств.

Процессор СМ 2103.62 выполняет логические и арифметические операции над данными в виде 16-разрядных слов и 8-разрядных байтов.

Оперативная память СМ-3100 имеет объем 32 Кслов, из которых 4 Кслова отведены для адресации внешних устройств.

Перфоленточное устройство ввода-вывода выполняет перфорацию со скоростью 50 строк в секунду, а скорость считывания не менее 300 строк в секунду.

Устройство алфавитно-цифровой печати СМ 6300.01 мозаичного типа, имеет быстродействие 180 знаков в секунду.

Алфавитно-цифровой дисплей VDT 52100-С (ВТА-2000) обеспечивает ввод, отображение и редактирование символьной информации. Размеры полезной площади экрана — 200×140 мм, число строк — 16, количество символов в строке—80, емкость буферной памяти — 1280 восьмиразрядных знаков.

Устройство внешней памяти СМ 5402.04 на сменных магнитных дисках состоит из кон-

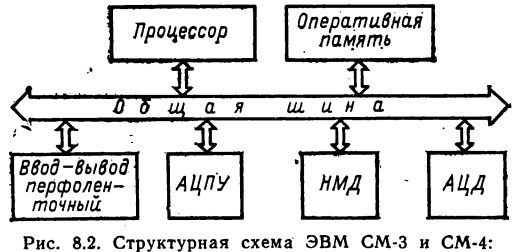


Рис. 8.2. Структурная схема ЭВМ СМ-3 и СМ-4: *АЦПУ* — алфавитно-цифровое печатающее устройство; *НМД* — накопитель на магнитных дисках; *АЦД* — алфавитно-цифровой дисплей

троллера и накопителей. Контроллер рассчитан на подключение до четырех блоков накопителей типа ИЗОТ-1370, каждый из которых обеспечивает запись, хранение и воспроизведение 4,8 Мбайт информации.

Специализированные технические средства САПР

Учитывая большой удельный объем, занимаемый в проектировании объектов электротехники и электроэнергетики операциями по обработке графической информации, целесообразно рассмотреть технические средства машинной графики, которые включают следующие группы устройств.

Устройства ввода графической информации. Наибольшее распространение в САПР получают полуавтоматические устройства (ПУВГИ) различных типов и принципов действия, в которых автоматизированы отсчет и фиксирование координат элементов чертежа, а выделение этих элементов выполняется человеком. В составе ПУВГИ имеются специальные функциональные клавиатуры, позволяющие дополнительно вводить алфавитно-цифровую информацию. При указании точек чертежа оператор может задавать тип элемента (например, прямая, окружность, текст).

Основные технические характеристики отечественных ПУВГИ приведены в табл. 8.3.

Чертежные автоматы (ЧА) используются в САПР для оформления результатов проектирования в форме чертежей, имеющих необходимые пояснительные тексты.

В состав технических средств ЕС ЭВМ также входят следующие устройства:

графическое регистрирующее устройство планшетного типа ЕС-7051 с рабочим полем 1000×1050 мм; максимальная скорость вычерчивания 50 мм/с; имеет три пишущих элемента. Устройство осуществляет прием графических данных через буферную память;

графические регистрирующие устройства рулонного типа ЕС-7052 и ЕС-7053; максимальная скорость вычерчивания 200 мм/с; рабочее поле 390×600 мм (ЕС-7052) и 841×1600 мм (ЕС-7053); имеют по три пишущих элемента. Снабжены буферной памятью;

графическое регистрирующее устройство ЕС-7054 планшетного типа с рабочим полем 1600×1200 мм (модель 1612) или 1000×800 мм (модель 1008); максимальная скорость вычерчивания 50 (модель 1612) или 100 мм/с (модель 1008).

Все представленные ЧА могут выполнять черчение различными типами и толщинами

Таблица 8.3. Технические характеристики ПУВГИ

Наименование устройств	Тип устройства	Размер рабочего поля, мм	Разрешающая способность, мм	Погрешность позиционирования, мм
ГАРНИ-1	Дискретный	1067×780	5,0; 0,5	±2,5
ПКГИО	Непрерывный	850×618	0,1	±±0,4
ЭМ-709	Дискретный	1200×900	0,1	±±0,2
АП-6261	Непрерывный	1189×841	0,025	±±0,15
АП-6262	Дискретный	594×841	0,4	±1,0
АП-6263	»	420×570	0,4; 0,2	±0,4

Таблица 8.4

Наименование устройства	Размер экрана, мм	Число адресуемых точек	Разрешающая способность, мм	Число типов линий	Количество символов
ЕС-7064, ЕС-7065	250×250	1024×1024	0,25	1	88
УПГИ	210×297	1024×1024	0,5	7	140
ЭПГ-400	240×240	1024×1024	0,5	4	96

линий, а также осуществлять линейную и круговую интерполяцию.

Графические дисплеи (ГД) предназначаются для интерактивного взаимодействия проектировщика с ЭВМ и позволяют производить ввод-вывод графической и алфавитно-цифровой информации на экран ЭЛТ. В составе ГД, как правило, имеются дополнительные средства ввода и редактирования данных: алфавитно-цифровая и функциональная клавиатура, световое перо, кодирующий планшет и др.

Некоторые технические данные ГД, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 8.4.

Автоматизированные рабочие места проектировщиков (АРМ)

АРМ представляют собой специальные вычислительные комплексы, предназначенные для работы как в автономном режиме, так и в режиме взаимодействия с большой ЭВМ вычислительного комплекса САПР.

Находящиеся в настоящее время в эксплуатации АРМ первого поколения строятся на базе мини-ЭВМ СМ-3 и СМ-4 и включают следующие разновидности:

АРМ разработчика радиоэлектронной аппаратуры (АРМ-Р);

АРМ конструктора-машиностроителя (АРМ-М);

АРМ технолога (АРМ-Т);

АРМ программиста (АРМ-П).

В составе АРМ-Р имеются следующие периферийные устройства:

ПУВГИ ЭМ-709;

чертежный автомат рулонного типа, имеющий рабочее поле 594×420 мм;

графический дисплей ЭПГ-400;

накопитель на магнитной ленте;

устройство ввода с перфокарт.

АРМ второго поколения строятся на базе ЭВМ СМ-4 и «Наири-41» и содержат широко изменяющуюся конфигурацию специализированных внешних устройств, определяемую проблемной ориентацией комплекса и допускающую одновременную и независимую работу нескольких пользователей.

Различают следующие конфигурации АРМ второго поколения:

АРМ2-01 — для проектирования радиоэлектронной аппаратуры и изделий машиностроения;

АРМ2-02 — для проектирования деталей машиностроения, технологических процессов их изготовления, разработки инструмента и оснастки (т. е. для технолога машиностроительной промышленности);

АРМ2-03 — для разработки программ для станков с числовым программным управлением;
АРМ2-04 — для разработки и редактирования программ и произвольной текстовой документации.

Структура комплекса вычислительных средств САПР, режимы его работы и применения

Проектирование любых технических объектов предполагает решение большого количества разнообразных задач, различающихся объемом, способом получения и представления информации, числом операций по ее преобразованию. В этих условиях при комплектовании средств технического обеспечения САПР целесообразно ориентироваться на комплекс ЭВМ различной производительности.

Формой построения комплекса вычислительных средств САПР может являться многоуровневая иерархическая структура. На верхнем уровне находится большая ЭВМ, имеющая многоцелевое назначение (она, например, может использоваться и для решения задач АСУ проектной организацией). Эта ЭВМ в САПР применяется для решения особо объемных расчетных задач, связанных, например, с параметрической оптимизацией объекта или детальным анализом его функционирования.

На следующих уровнях в зависимости от конкретных условий могут использоваться ЭВМ средней производительности или мини-ЭВМ. САПР являются системами коллективного пользования, с их помощью одновременно могут решать задачи сотрудники различных подразделений проектной организации. Поэтому на нижнем уровне иерархии имеется разветвленная сеть терминальных установок, которые могут находиться непосредственно в проектных подразделениях. Терминалы строятся на базе мини- или микро-ЭВМ. Набор периферийных устройств, включаемых в состав терминальных установок, зависит от особенностей решаемых проектных задач.

Схема комплекса технических средств автоматизированного проектирования показана на рис. 8.3. Структура технических средств индивидуального пользования представлена на рис. 8.4.

Разнообразие проектных задач, решаемых в САПР, ставит вопрос рационального применения ЭВМ. Для ЭВМ третьего поколения характерны два режима работы.

Однопрограммный режим работы ЭВМ предполагает обработку в данный момент времени одной программы одного пользователя и является характерным для мини- и микро-ЭВМ.

Мультипрограммирование — это специальная форма организации работы больших и средних ЭВМ, в соответствии с которой в оперативной памяти одновременно находится несколько независимых программ, параллельно обрабатываемых различными устройствами ЭВМ. Этот режим используется для более полной загрузки устройств ЭВМ, главным образом процессора.

ЭВМ третьего поколения могут использоваться в следующих режимах.

Режим пакетной обработки предполагает непрерывный процесс выполнения совокупности

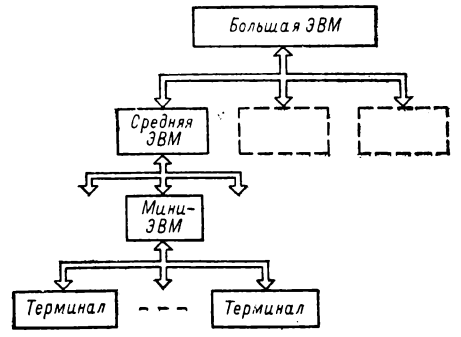


Рис. 8.3. Схема комплекса технических средств автоматизированного проектирования

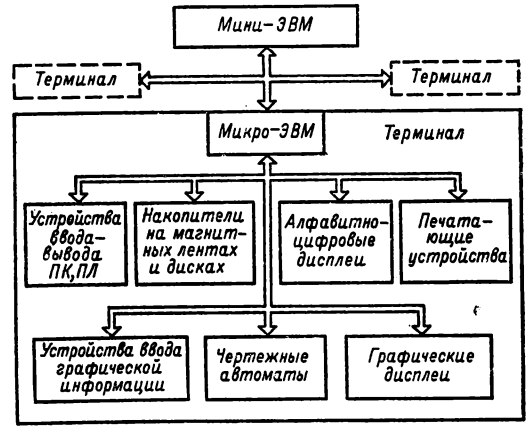


Рис. 8.4. Комплекс технических средств индивидуального пользования

программ, сгруппированных в пакет, путем автоматического перехода к следующей программе при завершении выполнения предыдущей. Разновидностью данного режима является удаленная пакетная обработка, когда пользователь связан с ЭВМ телефонным или телеграфным каналом. Ввод пакета и вывод результатов производится здесь на удаленный абонентский пульт. Время решения задачи при таком режиме использования ЭВМ зависит от места соответствующей программы в пакете.

Режим разделения времени связан с реализацией одновременной работы на ЭВМ нескольких пользователей с индивидуальных терминалов. ЭВМ одновременно выполняет задачи нескольких пользователей. При этом процессор обрабатывает каждое задание в течение короткого отрезка (кванта) времени. В этом случае небольшие задания требуют для своей реализации небольшого числа квантов времени, а следовательно, выполняются быстро.

Представленные режимы используются при решении проектных задач в САПР. Пакетная обработка применяется для заданий с большим временем решения. Режим разделения времени составляет основу организации диалогового взаимодействия проектировщика с ЭВМ. Организация такого взаимодействия целесообразна, когда имеются трудности формализации решаемой задачи, объем информации, вводимой в

ЭВМ, невелик, а время ожидания ответа ЭВМ не превышает 10—15 с.

Кроме того, ЭВМ может использоваться в режиме реального времени, когда она через соответствующие преобразователи сигналов включается непосредственно в контур управления некоторым объектом или процессом. Поэтому формирование управляющих сигналов должно производиться в реальном масштабе времени и к ЭВМ предъявляются соответствующие требования по быстродействию. Такой режим использования ЭВМ находит применение, например, в автоматизированных системах испытаний макетных, опытных или серийных образцов проектируемых изделий.

8.3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Математические модели электрических цепей

Моделирование электрических и электронных цепей на ЭВМ осуществляется с целью расчета их установившихся и переходных режимов, частотных, временных и других характеристик, анализа чувствительности, устойчивости и т. п. При моделировании формируется и решается система уравнений, описывающая соответствующий режим цепи и называемая ее математической моделью.

При формировании уравнений электрических и электронных цепей они, как правило, представляются в виде схемных моделей, т. е. эквивалентных схем с известными параметрами, состоящих из двухполюсных и многополюсных схемных элементов. К двухполюсным схемным элементам относятся независимые источники ЭДС и тока, резистивные, индуктивные и емкостные линейные и нелинейные двухполюсники (см. разд. 4). Простейшие многополюсные схемные элементы — управляемые (зависимые) источники ЭДС и тока. С помощью двухполюсных элементов и управляемых источников (УИ) можно построить схемные модели реальных компонентов электрических и электронных цепей — трансформаторов, транзисторов, усилителей и др.

Модели компонентов электрических и электронных цепей классифицируются по диапазону амплитуд сигналов (напряжений и токов) и по диапазону частот. В зависимости от диапазона амплитуд сигналов различают универсальные (глобальные) модели, пригодные для описания компонентов при всех возможных напряжениях и токах на их выводах, и локальные модели, предназначенные для описания компонентов в пределах ограниченных участков рабочего диапазона напряжений и токов. Для описания электронных элементов, например транзисторов, могут использоваться также модели для малых сигналов (малых переменных составляющих напряжений и токов); такие модели являются линейными и относятся к классу локальных. В зависимости от диапазона частот различают модели постоянного и переменного тока; последние могут также разделяться на низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные.

Из-за противоречия предъявляемых к моделям требований универсальности и точности, с одной стороны, и экономичности — с другой, для многих компонентов нельзя выделить наилучшие модели при любых режимах работы. Поэтому для моделирования цепей создают библиотеки моделей, содержащие в общем случае различные модели каждого компонента.

Функциональные узлы электронных цепей (например, операционные усилители, логические элементы, формирователи и др.) относятся к многополюсным компонентам и состоят из более простых многополюсных и двухполюсных элементов — транзисторов, диодов и т. д. Модели таких узлов могут быть получены в результате объединения моделей составляющих их элементов (полные модели). Полные модели являются весьма сложными, что повышает затраты машинного времени и оперативной памяти при моделировании. Поэтому целесообразно применение макромоделей функциональных узлов, т. е. моделей, описывающих с определенной точностью внешние характеристики таких узлов и содержащих существенно меньшее число схемных элементов по сравнению с полными моделями. Макромодели, как правило, строятся на основании паспортных данных на выходные параметры функциональных узлов.

Наряду со схемными моделями компонентов цепей могут использоваться и другие модели. Например, линейный многополюсник может быть описан матрицей параметров (матрицей проводимостей **Y**, гибридной матрицей **H** и др.); элементы таких матриц в общем случае зависят от частоты. Нелинейные многополюсники можно описать системой нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений. Такие модели называются аналитическими.

На основании схемной модели цепи формируется характеризующая ее система уравнений. При этом в качестве исходной используется информация о параметрах моделей и макромоделей компонентов и о связях компонентов между собой (компонентная и топологическая информация). Уравнения, описывающие модели компонентов (компонентные уравнения), и уравнения, определяемые структурой схемной модели (топологические уравнения Кирхгофа), образуют математическую модель в полном координатном базисе (под системой координат здесь понимается система независимых сечений и контуров).

При анализе электрических цепей на ЭВМ наиболее часто применяются математические модели на основании узловых, расширенных узловых уравнений и уравнений состояния (см. разд. 4). Такие модели имеют меньшую размерность по сравнению с моделью в полном координатном базисе и могут быть получены в результате ее преобразования.

Достоинствами моделей на основании узловых уравнений (уравнений с узловыми потенциалами) являются простота формирования и малая размерность. Формирование узловых уравнений сводится к суммированию проводимостей двухполюсников (с соответствующим знаком) и элементов матриц проводимостей многополюсников. Однако если двухполюсник имеет нулевое сопротивление или если многополюсник не имеет матрицы проводимостей, то такие модели нельзя составить непосредственно (т. е. без преобразования схемы). Поэтому бо-

лее универсальными являются модели, основанные на расширенных узловых уравнениях; они допускают наличие двухполюсников с нулевым сопротивлением или многополюсников, описываемых матрицей сопротивлений **Z** или гибридной матрицей **H**. Большая универсальность модели связана с увеличением ее размерности; переменными в системе уравнений служат потенциалы всех узлов (кроме базисного) и токи Z-ветвей.

Модели, основанные на уравнениях состояния, представляют собой систему дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производных, а также алгебраических уравнений для выходных переменных. Размерность системы дифференциальных уравнений не превышает суммарного числа реактивных элементов; в качестве переменных такой системы, как правило, используются напряжения на емкостях (заряды) и токи в индуктивностях (потокосцепления). Недостатком модели, основанной на уравнениях состояния, является сложность ее формирования при наличии зависимых переменных состояния; эта зависимость обусловливается контурами (сечениями), состоящими из емкостей и источников ЭДС (из индуктивностей или индуктивностей и источников тока), а также управляемыми источниками. Отмеченный недостаток компенсируется эффективностью применения модели для решения различных задач (расчет временны́х и частотных характеристик, полюсов и нулей передаточных функций, анализ устойчивости и др.).

Подробно узловые и расширенные узловые уравнения, а также уравнения состояния рассмотрены в разд. 4.

Особенности машинного расчета частотных и временны́х характеристик электрических цепей

При моделировании линейных электрических и электронных цепей с помощью узловых или расширенных узловых уравнений частотные характеристики рассчитываются либо непосредственно (уравнения решаются для множества дискретных значений частоты ω_k), либо по предварительно найденной передаточной или входной функции

$$T(p) = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \ldots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \ldots + b_1 p + b_0},$$

где p — комплексная переменная; a_i $(i=\overline{0, m})$ и b_j $(j=\overline{0, n})$ — действительные коэффициенты. Во втором случае на основании известной теоремы об определителе суммы трех матриц вначале вычисляются коэффициенты a_i и b_j, что требует расчета большого числа определителей. Частотные характеристики получаются затем при подстановке $p=j\omega$: $|T(j\omega)|$ — амплитудно-частотная характеристика, $\arg T(j\omega)$ — фазо-частотная характеристика.

Уравнения состояния линейной схемы во временно́й области имеют вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{v};$$
$$\mathbf{y} = \mathbf{A}_2\mathbf{x} + \mathbf{B}_2\mathbf{v},$$

где $\mathbf{x}=\mathbf{x}(t)$ — вектор переменных состояния; $\dot{\mathbf{x}}=d\mathbf{x}/dt$ — вектор производных этих переменных; $\mathbf{v}=\mathbf{v}(t)$ — вектор параметров независимых источников ЭДС и тока; $\mathbf{y}=\mathbf{y}(t)$ — вектор выходных переменных; $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{A}_2$, $\mathbf{B}_2$ — матричные коэффициенты. Если схема содержит один источник и определяется одна выходная переменная, то получается следующее выражение для передаточной функции:

$$\mathbf{T}(p) = \mathbf{A}_2(p\cdot\mathbf{1} - \mathbf{A}_1)^{-1}\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2.$$

При $p=j\omega$ могут быть рассчитаны частотные характеристики цепи. При этом обратная матрица

$$(p\cdot\mathbf{1} - \mathbf{A}_1)^{-1} = \frac{\mathbf{Q}_1 p^{n-1} + \mathbf{Q}_2 p^{n-2} + \ldots + \mathbf{Q}_{n-1} p + \mathbf{Q}_n}{p^n + q_1 p^{n-1} + \ldots + q_{n-1} p + q_n},$$

где $\mathbf{Q}_i$ — квадратные матрицы порядка n, равного числу элементов вектора $\mathbf{x}$; q_i — скалярные коэффициенты. Вычисление матричных и скалярных коэффициентов производится с помощью рекуррентного алгоритма Фаддева, согласно которому

$$\mathbf{Q}_1 = 1; \quad q_1 = -\operatorname{Sp}\mathbf{A}_1;$$
$$\mathbf{Q}_2 = \mathbf{Q}_1 p_1 + q_1\cdot 1; \quad q_2 = -\operatorname{Sp}(\mathbf{Q}_2\mathbf{A}_1)/2;$$
$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}_{k-1}\mathbf{A}_1 + q_{k-1}\cdot 1; \quad q_k = -\operatorname{Sp}(\mathbf{Q}_k\mathbf{A}_1)/k.$$

В приведенных соотношениях $\operatorname{Sp}(\cdot)$ — след матрицы $(\cdot)$, т. е. сумма ее диагональных элементов.

Временны́е характеристики электрических и электронных цепей рассчитываются на множестве дискретных значений времени t_k. При использовании уравнений состояния они интегрируются с помощью различных явных или неявных методов численного интегрирования. Общее выражение для различных численных методов интегрирования имеет вид:

$$x_{k+1} = \sum_{i=0}^{m} a_k x_{k-i} + h\sum_{i=0}^{m} b_k \dot{x}_{k-i} + hb_{-1}\dot{x}_{k+1}$$

где $x_{k+1}=x[(k+1)h]$; $x_{k-i}=x[(k-i)h]$ (здесь h — шаг интегрирования); a_k, b_k, b_{-1} — коэффициенты. Метод интегрирования называется явным, если $b_{-1}=0$, и неявным, если $b_{-1}\neq 0$. Применяются методы интегрирования различного порядка. Например, явный и неявный методы первого порядка (методы Эйлера) соответствуют следующим частным случаям:

$$x_{k+1} = x_k + h\dot{x}_k;$$
$$x_{k+1} = x_k + h\dot{x}_{k+1}.$$

Неявный метод второго порядка (метод трапеций) описывается формулой

$$x_{k+1} = x_k + h\dot{x}_k/2 + h\dot{x}_{k+1}/2.$$

С увеличением порядка метода уменьшаются методические погрешности расчета, но возрастает объем вычислений. Кроме того, различные методы интегрирования обладают разной областью устойчивости; метод называется устойчивым, если локальная методическая ошибка остается ограниченной по значению при числе шагов $k\to\infty$ для достаточно малого шага h. Условие устойчивости ограничивает шаг

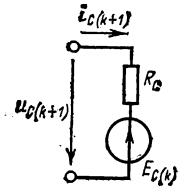


Рис. 8.5

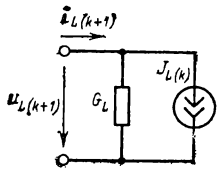


Рис. 8.6

h; так, для явного метода Эйлера шаг ограничен условием

$$h < (-2\,\mathrm{Re}\,\lambda_j)/|\lambda_j|^2,\ j=\overline{1,\ n},$$

где λ_j — собственное значение матрицы $\mathbf{A}_1$ (при условии, что все собственные значения различны). Ограничения на шаг h из условия устойчивости особенно существенны, если собственные значения матрицы $\mathbf{A}_1$ весьма значительно отличаются по значению (на несколько порядков). Неявные методы интегрирования обладают большей областью устойчивости по сравнению с явными; в частности, неявный метод Эйлера устойчив при любом шаге h.

С помощью неявных методов интегрирования расчет переходного процесса может быть сведен к решению множества систем алгебраических уравнений, которые характеризуют некоторые резистивные схемы — дискретные модели. Это объясняется тем, что неявные методы позволяют алгебраизировать уравнения реактивных элементов. Так, для линейной емкости C, характеризуемой соотношением

$$i_C = C\dot{u}_C,$$

где i_C, $\dot{u}_C$ — соответственно ток и напряжение емкостного элемента, при $x=u_C$ имеет соотношение

$$u_{C(k+1)} = E_{C(k)} + R_C\, i_{C(k+1)},$$

где

$$E_{C(k)} = \sum_{i=0}^{m} a_k\, u_{C(k-l)} + \frac{h}{C}\sum_{i=0}^{m} b_k\, i_{C(k-l)};$$

$$R_C = hb_{-1}/C,$$

что соответствует эквивалентной схеме емкости — резистивной дискретной модели, показанной на рис. 8.5. Аналогично для линейной индуктивности L получается соотношение

$$i_{L(k+1)} = J_{L(k)} + G_L\, u_{L(k+1)},$$

где

$$J_{L(k)} = \sum_{i=0}^{m} a_k\, i_{L(k-l)} + \frac{h}{L}\sum_{i=0}^{m} b_k\, u_{L(k-i)};$$

$$G_L = hb_{-1}/L.$$

Резистивная дискретная модель индуктивности приведена на рис. 8.6.

Резистивная дискретная модель всей линейной схемы получается при замене каждого емкостного и индуктивного элемента их эквивалентными схемами. Расчет таких моделей можно выполнить с помощью узловых или расширенных узловых уравнений.

Для нелинейных схем вместо уравнений состояния справедливы уравнения

$$\mathbf{D}(\mathbf{x})\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1\mathbf{x} + \mathbf{C}_1\mathbf{w}(\mathbf{z}) + \mathbf{B}_1\mathbf{v};$$
$$\mathbf{y} = \mathbf{A}_2\mathbf{x} + \mathbf{C}_2\mathbf{w}(\mathbf{z}) + \mathbf{B}_2\mathbf{v};$$
$$\mathbf{z} = \mathbf{A}_3\mathbf{x} + \mathbf{C}_3\mathbf{w}(\mathbf{z}) + \mathbf{B}_3\mathbf{v},$$

где $\mathbf{w}(\mathbf{z})$ — векторная нелинейная функция, описывающая вольт-амперные характеристики нелинейных резистивных двухполюсников; $\mathbf{D}(\mathbf{x})$ — матрица параметров нелинейных емкостных и индуктивных элементов; $\mathbf{A}_i$, $\mathbf{B}_i$, $\mathbf{C}_i$ $(i=\overline{1,\ 3})$ — матричные коэффициенты.

Уравнения могут быть автоматически сформированы на ЭВМ и решены с помощью явных или неявных методов интегрирования. При использовании неявных методов можно алгебраизировать уравнения реактивных элементов и свести задачу расчета переходного процесса к задаче решения множества нелинейных алгебраических уравнений. В этом случае нелинейным емкостным и индуктивным элементам можно поставить в соответствие нелинейные резистивные дискретные модели, обобщающие модели, приведенные на рис. 8.5 и 8.6; расчет дискретных нелинейных резистивных схем может быть выполнен с помощью узловых и расширенных узловых уравнений.

Решение нелинейных алгебраических уравнений на ЭВМ выполняется итерационными методами (метод простой итерации, метод Ньютона и др.). При использовании наиболее эффективного метода Ньютона анализ нелинейной резистивной схемы, описываемой нелинейными алгебраическими уравнениями, сводится к анализу множества линеаризованных резистивных схем и, следовательно, к решению множества линейных алгебраических уравнений. Такое решение на ЭВМ осуществляется с помощью численных методов (метод Гаусса, метод LU-разложения, т. е. разложения матрицы коэффициентов на нижне- и верхнетреугольные сомножители). При этом повышение эффективности расчета сложных схем достигается применением специальных методов хранения и обработки разреженных матриц.

Расчет чувствительности и устойчивости электрических цепей

Для оценки влияния отклонений параметров линейной схемы на ее частотные характеристики вводятся различные функции чувствительности. В частности, относительная чувствительность (первого порядка) передаточной функции $T=T(p)$ к изменению параметра x_i определяется как

$$S_{x_i}^{T(p)} = \frac{x_i}{T}\,\frac{\partial T}{\partial x_i}.$$

Действительная часть $S_{x_i}^{T(p)}$ характеризует отклонение амплитудно-частотной характеристики, обусловленное малой вариацией параметра x_i, а мнимая — фазо-частотной.

Расчет относительных чувствительностей с помощью ЭВМ может быть выполнен различными методами. Если схема описывается матричным узловым уравнением (см. разд. 4)

$$\mathbf{Y}^{(y)}\varphi = \mathbf{A}^{(y)}\mathbf{J}^{(в)} - \mathbf{A}\mathbf{Y}^{(в)}\mathbf{E}^{(в)},$$

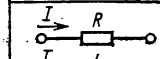
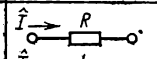
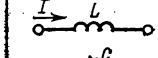
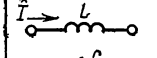
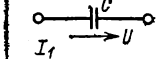
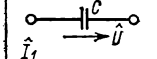
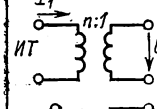
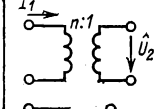
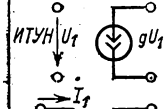
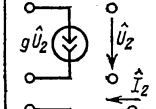
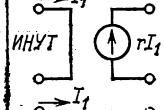
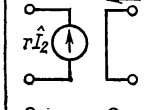
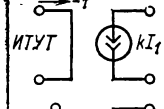
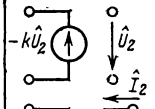
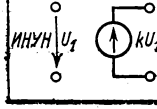
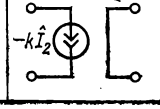
то из него нетрудно получить соотношение

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\varphi = -(\mathbf{Y}^{(y)})^{-1}\mathbf{A}^{(y)}\frac{\partial}{\partial x_i}\mathbf{Y}^{(в)}(\mathbf{E}^{(в)}+\mathbf{U}^{(в)}).$$

На этом соотношении базируется алгоритм машинного расчета чувствительности, который заключается в следующем. Вначале из узловых уравнений рассчитывается вектор напряжений ветвей $\mathbf{U}^{(в)}$ заданной схемы; далее обращается ее матрица узловых проводимостей $\mathbf{Y}^{(y)}$; выполняя умножения в соответствии с правой частью, находим производные потенциала любого узла по параметрам x_i. Зная эти производные, легко найти производные передаточной функции и, следовательно, относительные чувствительности. Отметим, что матрица $\partial\mathbf{Y}^{(в)}/\partial x_i$ имеет весьма простую структуру: все элементы этой матрицы равны 0, за исключением элемента, соответствующего параметру (проводимости) x_i, который равен 1.

Другой метод расчета чувствительности — метод присоединенной схемы. Такая схема имеет топологию, аналогичную топологии заданной схемы. Элементы двух схем, попарно соответствующие друг другу, показаны в табл. 8.5

Таблица 8.5. **Элементы исходной и присоединенной схем. Формулы для расчета проводимостей**

Исходная схема	Присоединенная схема	Параметр	Производная
		R	$I\hat{I}$
		L	$j\omega I\hat{I}$
		C	$-j\omega U\hat{U}$
		n	$U_2\hat{I}_1+I_1\hat{U}_2$
		g	$U_2\hat{I}_1+I_1\hat{U}_2$
		r	$I_1\hat{I}_2$
		k	$-I_1\hat{U}_2$
		k	$U_1\hat{I}_2$

(в этой таблице ИТ — идеальный трансформатор; ИТУН — источник тока, управляемый напряжением с параметром g; ИНУТ — источник напряжения, управляемый током с параметром r; ИНУН — источник напряжения, управляемый напряжением с параметром k; ИТУТ — источник тока, управляемый током с параметром k).

Для расчета чувствительностей методом присоединенной схемы необходимо произвести анализ как исходной, так и присоединенной схемы. Нетрудно показать, что если исходная схема характеризуется матрицей узловых проводимостей $\mathbf{Y}^{(y)}$, то матрица узловых проводимостей присоединенной схемы $\hat{\mathbf{Y}}^{(y)} = [\mathbf{Y}^{(y)}]^{т}$ (где т — индекс, обозначающий транспозицию матрицы); это соотношение существенно упрощает анализ присоединенной схемы. Независимые источники исходной и присоединенной схем имеют одинаковую природу, но различны по значениям. В частности, источнику ЭДС исходной схемы соответствует источник нулевой ЭДС (короткозамкнутая ветвь); источнику нулевого тока (разомкнутой ветви) исходной схемы соответствует источник единичного тока в присоединенной схеме.

Из расчета исходной и присоединенной схем определяются напряжения и токи соответствующих элементов. Зная эти напряжения и токи, можно вычислить производные выходной переменной (например, напряжения) по параметрам элементов; формулы для расчета производных приведены в табл. 8.5.

Достоинством метода присоединенной схемы является возможность расчета производных по всем параметрам на основании результатов анализа двух топологически одинаковых схем.

Аналогично выполняется расчет производных (и, следовательно, чувствительностей) с помощью расширенных узловых уравнений. Рассмотренные методы могут быть обобщены для расчета чувствительностей второго порядка.

Для линейных и нелинейных схем можно ввести понятие чувствительности во временно́й области; методы расчета такой чувствительности рассмотрены в [8.20, 8.23, 8.26].

При использовании ЭВМ задача анализа устойчивости может быть решена непосредственно, т. е. в результате расчета полюсов передаточной функции $T(p)$. Если линейная схема описывается уравнениями состояния, то полюсы передаточной функции совпадают с собственными значениями матрицы $\mathbf{A}_1$, т. е. с корнями уравнения

$$\det(\lambda\cdot\mathbf{1} - \mathbf{A}_1) = 0.$$

Для решения уравнения можно применить стандартные программы определения собственных значений матрицы. Из известных алгоритмов определения собственных значений следует выделить эффективный QR-алгоритм.

Если используются узловые или расширенные узловые уравнения, то нахождение полюсов передаточной функции сводится к решению так называемой обобщенной проблемы собственных значений.

Наряду с непосредственным анализом устойчивости может быть автоматизирован анализ устойчивости и с помощью известных косвенных критериев.

Модели и алгоритмы анализа электромеханического преобразования энергии, тепловых и деформационных процессов в электромеханических устройствах

Математические модели и алгоритмы анализа физических процессов составляют основу для решения задач автоматизированного проектирования электромеханических устройств (ЭМУ).

Основное электромеханическое преобразование энергии в ЭМУ, несмотря на различие их принципов действия и типов, обусловливается одними и теми же физическими процессами, что позволяет дать его обобщенное математическое описание. При этом ЭМУ рассматривается как совокупность электрических контуров, взаимодействие которых во времени и пространстве в соответствии с законами электродинамики и механики приводит к возникновению ЭДС. В любом k-м контуре, имеющем созданное током какого-то другого j-го контура потокосцепление $\Psi = M_{kj}(\varphi) i_j(t)$, которое в общем случае меняется во времени (t) и перемещается в пространстве (φ), индуцируется трансформаторная ЭДС $e_{тр}$, обусловленная изменением магнитной индукции, и ЭДС вращения $e_{вр}$, связанная с относительным перемещением контуров с угловой частотой $\Omega = d\varphi/dt$. Общая ЭДС контура может быть выражена как

$$e_k = (e_{тр} + e_{вр})_k = -d\Psi/dt.$$

Если к данному контуру с активным сопротивлением r_k и индуктивностью L_k приложено, кроме того, напряжение u_k, то ток в нем i_k определяется действием u_k и e_k и уравнение электрического равновесия напряжений будет иметь вид

$$u_k = r_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} - e_k = r_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{kj} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial M_{kj}}{\partial \varphi} \Omega i_j.$$

Для совокупности взаимосвязанных контуров уравнения равновесия можно записать в общей матричной форме

$$\overset{\vee}{\mathbf{u}} = \left[\mathbf{r} + \mathbf{L}\frac{d}{dt} + \mathbf{N}\Omega\right]\overset{\vee}{\mathbf{i}},$$

где $\overset{\vee}{\mathbf{u}}, \overset{\vee}{\mathbf{i}}, \mathbf{r}, \mathbf{L}, \mathbf{N}$ — соответственно матрицы напряжений, токов, активных сопротивлений, индуктивностей и коэффициентов ЭДС вращения.

Матрица $\mathbf{L}$ включает коэффициенты собственной L_k и взаимной M_{kj} индуктивностей контуров.

Полная мощность всех контуров p определяется как сумма произведений их напряжений и токов

$$p = \overset{\vee}{\mathbf{i}}^{\mathrm{T}} \overset{\vee}{\mathbf{u}} = \overset{\vee}{\mathbf{i}}^{\mathrm{T}} \mathbf{r} \overset{\vee}{\mathbf{i}} + \overset{\vee}{\mathbf{i}}^{\mathrm{T}} \mathbf{L} \frac{d\overset{\vee}{\mathbf{i}}}{dt} + \overset{\vee}{\mathbf{i}}^{\mathrm{T}} \mathbf{N} \Omega \overset{\vee}{\mathbf{i}},$$

где $\overset{\vee}{\mathbf{i}}^{\mathrm{T}}$ — транспонированная матрица токов.

Первое слагаемое определяет активную мощность потерь в контурах, второе — реактивную мощность, соответствующую запасенной энергии в созданном магнитном поле, а последнее — механическую мощность p_2 от взаимодействия контуров. Электромагнитный момент, развиваемый ЭМУ, определяется как

$$M = \frac{p_2}{\Omega} = \left(\overset{\vee}{\mathbf{i}}^{\mathrm{T}} \mathbf{N} \overset{\vee}{\mathbf{i}}\right).$$

Движение ротора ЭМУ при наличии момента нагрузки M_c определяется уравнением

$$J \frac{d\Omega}{dt} = (M - M_c),$$

где J — момент инерции вращающихся частей ЭМУ.

Приведенные уравнения однозначно определяют процесс электромеханического преобразования энергии в любом ЭМУ. Конкретная форма записи уравнений и их анализ значительно упрощаются при использовании различных линейных (действительных или комплексных) преобразований координат.

В ряде практически важных случаев бывает необходимо проанализировать тепловые и деформационные процессы, сопровождающие основное электромеханическое преобразование энергии в ЭМУ.

Для математического описания тепловых и деформационных процессов находят применение методы электрической аналогии. При этом конструкция ЭМУ заменяется системой взаимосвязанных элементов. Температуры и деформации в пределах каждого элемента принимаются постоянными и равными средним, а реально распределенные связи и воздействия осредняются и заменяются сосредоточенными. На основе электроаналогии система заменяется эквивалентной электрической цепью, для анализа которой применяются методы решения задач электротехники.

Основные эквивалентные соотношения между величинами, характеризующими электрическое, тепловое и деформационное поле, приведены в табл. 8.6.

Математическое описание эквивалентной тепловой схемы, составленной для анализа

Таблица 8.6. **Основные эквивалентные соотношения**

Электрическое поле	Тепловое поле	Деформационное поле
Электрический потенциал φ, В	Температура T, К	Перемещение Δl, м
Плотность тока J, А/см^2	Плотность теплового потока q_T, Вт/м^2	Напряжение σ, Па
Ток $I = \int_S J dS$, А	Тепловой поток (мощность тепловых потерь) P_T, Вт	Сила F, Н
Удельная электрическая проводимость $\rho_э$, Ом·м	Удельная теплопроводность λ, Вт/(м·К)	Модуль упругости E, Па

переходного теплового процесса, представляет собой систему дифференциальных уравнений:

$$\overset{\vee}{C}\frac{d\overset{\vee}{T}}{d\tau} = \overset{\vee}{A}\overset{\vee}{T} + \overset{\vee}{P},$$

где $\overset{\vee}{C}$ — диагональная матрица теплоемкостей выделенных элементов; D — оператор дифференцирования по времени $(d/d\tau)$; $\overset{\vee}{T}$ — вектор превышений температур элементов над окружающей средой; $\overset{\vee}{A}$ — матрица коэффициентов тепловых связей между элементами:

$$\overset{\vee}{A} = \begin{Vmatrix} A_{11} \dots A_{1n} \\ \vdots \quad \vdots \\ A_{n1} \dots A_{nn} \end{Vmatrix};$$

$\overset{\vee}{P}$ — вектор тепловых потерь в элементах; n — число выделенных элементов.

Для описания установившегося теплового процесса имеем систему алгебраических уравнений

$$\overset{\vee}{A}\overset{\vee}{T} = \overset{\vee}{P}.$$

Деформационные схемы описываются системой алгебраических уравнений

$$\overset{\vee}{G}\overset{\vee}{\Delta l} = \overset{\vee}{F},$$

где $\overset{\vee}{G}$ — матрица жесткостей элементов (проводимостей эквивалентной деформационной схемы):

$$\overset{\vee}{G} = \begin{Vmatrix} G_{11} \dots G_{1n} \\ \vdots \quad \vdots \\ G_{n1} \dots G_{nn} \end{Vmatrix};$$

$G = ES/l$; S — сечение; l — длина; $\overset{\vee}{F}$ — вектор сил, действующих на элементы конструкции.

Порядок систем уравнений определяется количеством элементов в соответствующих схемах замещения. При увеличении числа элементов повышается точность расчетов, но в то же время значительно возрастает их длительность. Поэтому на начальных стадиях проектирования, когда бывает достаточно приблизительной оценки тепловых и деформационных показателей, количество элементов в схемах замещения может не превышать 3—4. Для уточнения показателей найденного варианта проекта следует принять более детальное разбиение (до 20—40 элементов).

На основе рассмотренных частных математических моделей может быть сформирована системная модель ЭМУ, предназначенная для совместного анализа процессов различной физической природы.

Алгоритмы вероятностного анализа рабочих показателей электротехнических и электроэнергетических объектов

Под влиянием неизбежных отклонений геометрических размеров, свойств используемых материалов и других параметров изделий в процессе изготовления, а также изменений внешних условий при эксплуатации значения рабочих показателей получают некоторые отклонения от расчетного уровня. Это может приводить к браку в производстве и к невыполнению функциональных задач в эксплуатации. Поэтому важно учесть возможный разброс рабочих показателей объектов уже на стадии проектирования.

В общем случае технологические и эксплуатационные воздействия носят случайный характер, поэтому параметры объектов следует представлять случайными величинами или случайными функциями. Допустимые изменения параметров задаются допусками.

Задачей вероятностного анализа является определение разброса значений рабочих показателей Y_j, $j=1, \dots, m$ для объекта с функциональными связями $Y_j = f_j(x_1, \dots, x_n)$ при заданных распределениях случайных значений параметров $x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$ в пределах допусков $x_{i\,min} \leqslant x_i \leqslant x_{i\,max}$.

Наиболее строгим и информативным методом вероятностного анализа является метод статистических испытаний, который воспроизводит натурные эксперименты с некоторым множеством объектов и позволяет использовать для обработки результатов экспериментов методы математической статистики. Упрощенная блок-схема алгоритма вероятностного анализа по методу статистических испытаний представлена на рис. 8.7.

В соответствии с алгоритмом многократно получаются совокупности случайных значений параметров, каждая из которых являет собой конкретный вариант объекта или конкретные условия эксплуатации определенного объекта. Для получения этих случайных значений на ЭВМ применяются специальные программы — датчики случайных чисел, с помощью которых могут моделироваться различные распределения вероятностей. Затем с помощью блока функциональных связей значения параметров преобразуются в соответствующие значения рабочих показателей, которые подвергаются ста-

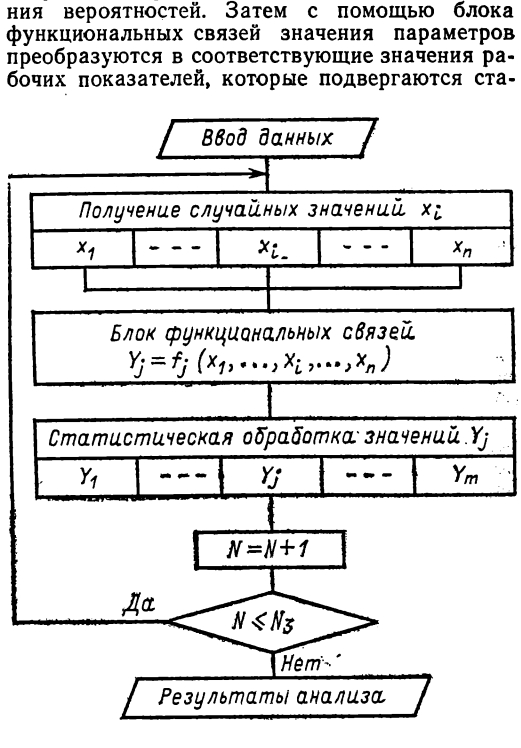


Рис. 8.7. Упрощенная схема алгоритма вероятностного анализа

тистической обработке. По завершении заданного числа испытаний $N_э$, которое по условиям требуемой достоверности и точности составляет обычно $(3—5)\cdot 10^3$, может быть получена полная информация о разбросе значений рабочих показателей: номинальное значение (при нулевых допусках), математическое ожидание, вероятные границы диапазонов разброса $Y_{j\,min}, ..., Y_{j\,max}$, графики плотности распределения вероятности Y_j, построенные на этих диапазонах, вероятности попадания значений Y_j в заданные пределы и др.

Проведение вероятностного анализа дает возможность обоснованно подойти к назначению допусков на параметры объектов, оценить вероятность удовлетворения требований ТЗ и возможный уровень брака в производстве, установить эксплуатационную нестабильность показателей, моделировать испытания объектов, разработать требования к технологическому процессу и условиям эксплуатации и оценивать эффективность использования различных способов управления качеством продукции.

8.4. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Основные понятия и постановка задачи оптимизации

Целью проектирования является определение объектов, выполняющих заданные функции наилучшим образом. При этом важно учитывать затраты на производство и эксплуатацию проектируемых объектов, сроки проектирования и другие факторы. Все это достигается оптимизацией проектных решений, строгий подход к которой стал возможен благодаря применению ЭВМ.

Проектирование с помощью ЭВМ требует формализованного представления решаемых задач. Для этого необходимо определить ряд понятий.

Совокупность рабочих показателей $\mathbf{y}=(y_1, ..., y_m)$, характеризующих функциональные свойства объекта проектирования, однозначно определяется вектором параметров $\mathbf{x}=(x_1, ..., x_n)$ посредством выражений вида

$$y_j = \varphi_j(\mathbf{x}), \quad j = 1, m.$$

Множество параметров можно разделить на внутренние, присущие непосредственно объекту, и внешние, характеризующие влияния на объект внешней среды. Внутренние параметры в процессе проектирования фиксируются на определенном уровне и в дальнейшем остаются неизменными во времени. Внешние параметры определяют управляющее воздействие, которое зависит от времени и может быть представлено r-мерным вектором по числу этих параметров:

$$\mathbf{u}(t) = [u_1(t), \ldots, u_r(t)].$$

Уровень рабочих показателей, зависящих от управляющих воздействий, описывается в каждый момент времени координатами состояния, которые составляют вектор состояния объекта

$$\mathbf{z} = [z_1(\mathbf{u}, t), \ldots, z_k(\mathbf{u}, t)].$$

Из всего множества параметров выделяют группу параметров оптимизации, изменением значений которых добиваются улучшения рабочих показателей объекта. Остальные параметры остаются постоянными в процессе поиска оптимальных проектных решений или функционально зависят от оптимизируемых параметров. Важнейшими требованиями к оптимизируемым параметрам являются однозначность определения значений рабочих показателей, взаимная независимость и управляемость, понимаемая как возможность изменения параметров в процессе оптимизации.

Для определения оптимальных проектных решений необходимо один или несколько наиболее важных по условиям решаемой задачи рабочих показателей выделить в качестве критериев оптимальности или функций цели $Q_j (j=1, ..., l)$. Функции цели должны правильно отражать существо задачи и ощутимо зависеть от параметров оптимизации. В качестве функций цели при проектировании объектов электротехники и электроэнергетики могут выбираться стоимость производства и эксплуатации объектов, КПД, масса и габариты, надежность, быстродействие и пр.

Проектирование любых технических объектов ведется в условиях действия ограничений, которые накладываются на изменения параметров и показателей и определяются техническим заданием, стандартами и другими директивными документами, а также геометрическими, физическими и технико-экономическими соотношениями, включаемыми в методику проектирования того или иного класса объектов. Основными являются ограничения ресурсов оптимизации (энергетических, информационных и др.), а также ограничения массы и габаритов. При снятии этих ограничений оптимизация, как правило, теряет смысл. К основным ограничениям относятся также требования к уровню показателей объекта, которые не были выбраны в качестве функции цели. Ограничения на геометрические размеры, в том числе требования их неотрицательности и технологической выполнимости, составляют группу вспомогательных ограничений. Все ограничения задаются в виде равенств или неравенств и определяют область допустимых изменений оптимизируемых параметров D.

Тогда решение задачи оптимизации состоит в определении вектора параметров $\mathbf{x}^*$, принадлежащего области D и дающего экстремальное значение функции цели:

$$Q(\mathbf{x}^*) = \operatorname*{extr}_{\mathbf{x} \in D} [Q(\mathbf{x})].$$

В данной формулировке задачи предполагается, что функция цели единственная.

Задача поиска оптимального управления формулируется следующим образом. Уравнения, описывающие поведение объекта управления, имеют вид:

$$\frac{d\mathbf{z}}{dt} = f(\mathbf{z}, \mathbf{u}).$$

Предположим, что на управление $\mathbf{u}$ накладываются ограничения, т. е.

$$\mathbf{u} \in U,$$

где U — некоторая замкнутая область в пространстве параметров управления.

В фазовом пространстве z заданы начальное $\mathbf{z}^0$ и конечное $\mathbf{z}^1$ состояния объекта управ-

ления. Тогда среди всех допустимых управлений, для которых траектории объекта проходят через начальное и конечное состояния, необходимо выбрать такое, для которого функционал

$$J(\mathbf{z}, \mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_1} f(\mathbf{z}, \mathbf{u})\, dt$$

принимает минимальное значение. Здесь $\mathbf{z}(t)$ является решением системы с начальными условиями $\mathbf{z}(t_0) = z^0$, соответствующим управлению $\mathbf{u}(t)$, а t_1 — момент времени, для которого $\mathbf{z}(t_1) = z^1$.

При необходимости проведения совместной оптимизации внутренних параметров объекта и алгоритмов управления следует учитывать зависимость фазовых координат от параметров объекта, т. е.

$$\mathbf{z} = [z_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \ldots, z_k(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)].$$

Функция цели в области допустимых изменений параметров может иметь несколько локальных экстремумов. В задачу оптимизации входит определение среди них точки глобального экстремума. При наличии ограничений на параметры объекта оптимизации определяется условный экстремум Q, местоположение которого может и не совпадать с точкой глобального экстремума, когда последняя находится за пределами области D.

Многокритериальная оптимизация

В реальных задачах проектирования бывает весьма трудно выделить среди множества рабочих показателей единственную функцию цели. Поэтому необходимо в общем случае рассматривать задачи оптимизации с учетом сразу нескольких критериев выбора лучших проектных решений.

При многокритериальной оптимизации качество проектного решения первоначально характеризуется уже не одним числом, а набором из l чисел (по количеству учитываемых критериев), каждое из которых является значением соответствующей функции цели

$$Q_1 = f_1(x_1, \ldots, x_n);$$

$$\ldots\ldots$$

$$Q_l = f_l(x_1, \ldots, x_n).$$

Отдельные функции цели могут отражать качественно различные стороны объекта, поэтому сравнение вариантов проекта по вектору $\mathbf{Q}$ оказывается невозможным без привлечения дополнительных критериев предпочтения. В математическом плане решение многокритериальной задачи оптимизации состоит в определении множества эффективных альтернатив, т. е. вариантов проекта, для которых невозможно улучшить значения одних функций цели, не ухудшив при этом значений других.

Общепринятый подход к решению задач многокритериальной оптимизации состоит в применении различных способов сопоставления результатов, получаемых по отдельным критериям. Условившись о конкретных способах сравнительной оценки, удается свести задачу векторной оптимизации к скалярной и применить для решения последней хорошо разработанные методы и алгоритмы однокритериальной оптимизации.

Так, например, результирующий критерий $Q_\text{р}$ можно выразить в виде произведения частных критериев

$$Q_\text{р} = Q_1 Q_2 \ldots Q_l$$

или как взвешенную сумму нормированных значений частных критериев

$$Q_\text{р} = c_1 Q_1' + c_2 Q_2' + \ldots + c_l Q_l';$$

$$Q_i' = Q_i / Q_{i0}, \quad i = 1, 2, \ldots, l;$$

$$\sum_{i=1}^{l} c_i = 1, \quad c_i > 0,$$

где Q_{i0} — опорное значение критерия Q_i, принимаемое за единицу его измерения; c_i — весовые коэффициенты, выбираемые исходя из относительной важности каждого критерия.

Другой подход характеризует метод последовательных уступок. Здесь предварительно все функции ранжируются по степени их важности. Затем решается задача однокритериальной оптимизации по отношению к наиболее важной функции цели Q_1 при игнорировании результатов, получаемых при этом по всем остальным критериям. Далее задается уступка ΔQ_1, т. е. допустимое ухудшение Q_1 в сравнении с его оптимальным значением, и на следующем шаге производится оптимизация по критерию Q_2. При этом должно выполняться условие, что уровень Q_1 должен быть не хуже заданного уступкой ΔQ_1. Аналогичные действия повторяются для других критериев до получения экстремального значения Q_l при выполнении соответствующих ограничений на остальные критерии.

Методы и алгоритмы поисковой оптимизации

Существо методов поисковой оптимизации состоит в организации пошагового движения изображающей точки, соответствующей варианту проекта, в пространстве параметров от некоторого начального состояния к точке, дающей приближение к экстремуму функции цели. Все поисковые методы характеризует общая последовательность действий, представленная на рис. 8.8. В данном случае для проверки ограничений и определения значения функции цели используется цифровая модель объекта, представляющая собой реализацию соответствующей математической модели на ЭВМ. Поисковые методы являются численными, их применение позволяет определить только приближение к оптимальному варианту проекта. Как правило, точность определения экстремума функции цели задается некоторым конечным размером шага по параметрам оптимизации. Все множество поисковых методов различается способами организации движения изображающей точки, а также условиями окончания поиска и подразделяется на методы пассивного и направленного поиска. Одна из возможных классификаций поисковых методов представлена на рис. 8.9.

Пассивный поиск заключается в равномерном просмотре наперед заданного количества

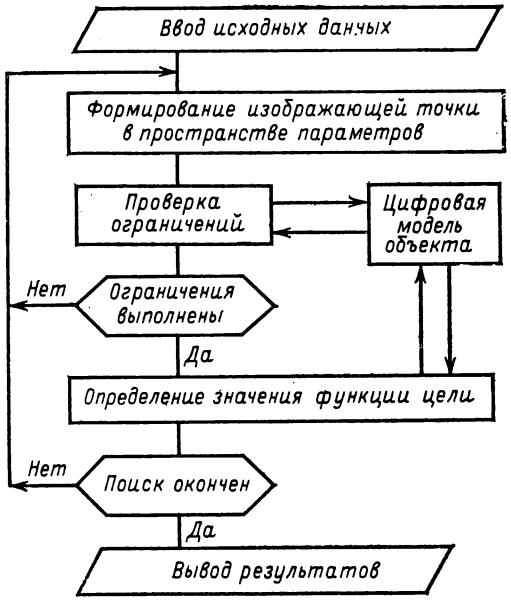


Рис. 8.8. Общая схема методов поиска

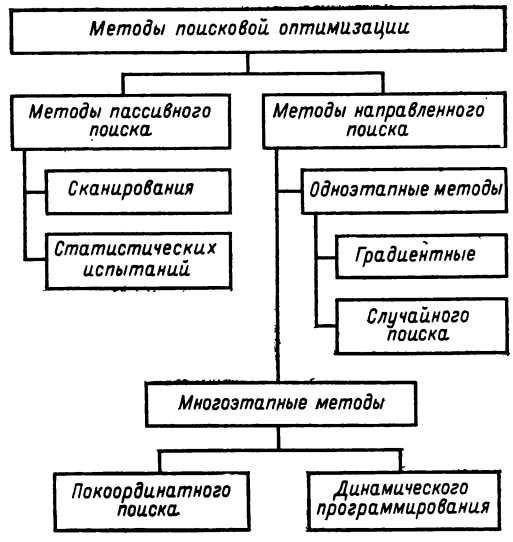


Рис. 8.9. Классификация методов поиска

вариантов проекта, принадлежащих заданной области изменения параметров оптимизации. К этой группе относятся методы сканирования и статистических испытаний.

Алгоритм метода сканирования организует просмотр заданных узлов n-мерной решетки в области изменения параметров оптимизации, которая определяется условиями

$$x_{imin} \leqslant x_i \leqslant x_{imax}, \quad i = 1, \ldots, n.$$

При этом диапазоны изменения разделяются на некоторое количество отрезков N_i. Условие окончания поиска состоит в просмотре всех узлов решетки, количество которых определяется как

$$N = \prod_{i=1}^{n} N_i.$$

Местоположение экстремума функции цели определяется с точностью Δ, характеризуемой относительным объемом n-мерного параллелепипеда, ограниченного отрезками Δx_i, т. е.

$$\Delta = \prod_{i=1}^{n} \frac{\Delta x_i}{x_{imax} - x_{imin}}.$$

Алгоритм статистических испытаний основывается на просмотре изображающих точек, рассеянных в области изменения оптимизируемых параметров случайным образом в соответствии с равномерным распределением вероятности. Точность определения местоположения экстремума функции цели определяется также по Δ, а условие окончания поиска состоит в просмотре такого количества изображающих точек, которое обеспечивает попадание в процессе поиска случайной изображающей точки в каждый n-мерный объем Δ с уровнем доверительной вероятности p и вычисляется как

$$N = \frac{\lg(1-p)}{\lg(1-\Delta)}.$$

При достаточной простоте реализующих их алгоритмов методы пассивного поиска позволяют определить приближение к глобальному экстремуму функции цели, причем поиск не зависит от ограничений.

Существо методов направленного поиска состоит в выборе направления движения из каждой очередной точки в пространстве параметров таким образом, чтобы при этом улучшались результаты оптимизации, полученные на предыдущих шагах. Группу методов направленного поиска составляют одноэтапные (градиентные и случайного поиска) и многоэтапные (координатного поиска и динамического программирования) методы.

Алгоритм градиентного метода организует движение изображающей точки в направлении градиента (или антиградиента) функции цели, который определяется численно как

$$\operatorname{grad} Q \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta Q_i}{\delta x_i} x_i,$$

где x_i — единичный вектор по оси x_i; δx_i — приращение параметра x_i; δQ_i — соответствующее приращение функции цели. Условием окончания поиска в данном случае служит уменьшение величины рабочего шага до некоторого наперед заданного предела. Это условие для каждого параметра можно записать в виде

$$|h_{x_i}| \leqslant \varepsilon,$$

где h_{x_i} — проекция рабочего шага h на ось x_i; ε — некоторое положительное наперед заданное малое число.

В соответствии с алгоритмом случайного поиска из некоторой точки в пространстве параметров делается несколько пробных шагов в случайных направлениях. Приращения функции цели, полученные на каждом пробном шаге, сравниваются между собой. В направлении, для которого улучшение функции цели оказа-

лось наибольшим, выполняется рабочий шаг. Для формирования пробных шагов здесь используются датчики случайных чисел. В остальном рассматриваемому алгоритму присущи все особенности алгоритма градиентного метода.

Алгоритм покоординатного поиска предусматривает поэтапное приближение к точке экстремума функции цели. На каждом этапе поиск ведется по одному параметру при зафиксированных значениях всех остальных. Здесь также предусматривается уменьшение величины рабочего шага при невозможности улучшения результатов оптимизации с его первоначальным значением. Условие окончания поиска определяется по ε.

Методы направленного поиска характеризуются более сложными алгоритмами в сравнении с пассивным поиском, работоспособность их зависит от ограничений. Они позволяют определять только приближения к локальным экстремумам функций цели. На практике получили применение алгоритмы, в которых направленный поиск ведется из нескольких случайных точек в пространстве параметров оптимизации. Это позволяет определить приближение к точке глобального экстремума функции цели и в некоторой степени отстроиться от действия ограничений за счет частичного исследования границы допустимой области. Кроме того, при наличии ограничений находят применение методы зигзагообразного движения вдоль границы, штрафных функций, проекции градиента.

В целом методы направленного поиска оказываются более эффективными в сравнении с методами пассивного поиска, особенно при большом числе параметров оптимизации и повышенной точности. Вместе с тем методы пассивного поиска находят применение для предварительного исследования области поиска и для выбора начальных точек в пространстве параметров.

При создании САПР, как правило, необходимо разрабатывать комплекс алгоритмов и программ оптимизации.

Задачи оптимального проектирования электрических цепей

Задачи оптимизации, возникающие при проектировании электротехнических объектов, в частности электрических цепей, весьма разнообразны. Эти задачи можно разделить на задачи оптимизации детерминированных и статистических критериев.

Оптимизация может выполняться на различных этапах проектирования, которые не приводят к единственному решению. Например, при проектировании частотно-избирательных электрических и электронных цепей (фильтров, корректоров и др.) целесообразна оптимизация на двух основных этапах схемотехнического проектирования — аппроксимации и реализации. На этапе аппроксимации по заданным требованиям к частотным характеристикам (при синтезе в частотной области) определяется передаточная функция $T(p)$, принадлежащая классу реализуемых функций; оптимизации подлежат параметры этой функции (степени и коэффициенты полиномов в числителе и знаменателе). На этапе реализации определяются параметры схемы; эти параметры также можно оптимизировать по различным критериям. В общем случае оптимизации подлежат не только схемные параметры, но и их допуски.

Если проектируется электрическая цепь, для которой задана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $T_0(\omega)$ или характеристика затухания (ХЗ)

$$A_0(\omega) = -20 \lg T_0(\omega)$$

на дискретном множестве частот Ω, то задачей оптимальной аппроксимации является определение реализуемой передаточной функции (выход/вход) $T(p, \mathbf{x})$ минимального порядка n с ХЗ

$$A(\omega, \mathbf{x}) = -20 \lg T(\omega, \mathbf{x}) = -20 \lg |T(j\omega, \mathbf{x})|,$$

удовлетворяющей соотношению

$$\max P_A(\omega) \,|\, A_0(\omega) - A(\omega, \mathbf{x}) \,| \leqslant \Delta_A; \quad \omega \in \Omega.$$

В этом соотношении $\mathbf{x}$ — вектор искомых параметров передаточной функции (коэффициентов полиномов знаменателя и числителя); $P_A(\omega)$ — весовая функция, определяющая распределение погрешности аппроксимации по множеству Ω [в простейшем случае, когда погрешность распределена равномерно, $P_A(\omega) = 1$]; Δ_A — точность аппроксимации (число, определяющее близость аппроксимирующей и аппроксимируемой функций).

Решение задачи оптимальной аппроксимации ХЗ можно осуществлять поэтапно. Вначале при фиксированных степенях n и m полиномов знаменателя и числителя передаточной функции $T(p)$ определяется такая функция, для которой выполняется равенство

$$\max P_A(\omega) \,|\, A_0(\omega) - A(\omega, \mathbf{x}) \,| = \min; \quad \omega \in \Omega.$$

Далее находится передаточная функция минимального порядка, обеспечивающая заданную точность аппроксимации.

Характеристика затухания является трансцендентной функцией, поэтому ее непосредственное использование неудобно. Практически удобнее воспользоваться дробно-рациональной функцией $F(\omega, \xi)$, представляющей собой квадрат модуля передаточной функции T; ξ — вектор, элементы которого суть коэффициенты знаменателя и числителя функции $F(\omega, \xi)$. Тогда задача оптимальной аппроксимации сводится к последовательному решению задач вида

$$\max P(\omega) \,|\, F_0(\omega) - F(\omega, \xi) \,| = \min; \quad \omega \in \Omega,$$

где $P(\omega)$ и $F_0(\omega)$ — функции, которые легко определяются по известным функциям $P_A(\omega)$ и $A_0(\omega)$. Если найдена функция $F(\omega, \xi)$, то можно вычислить передаточную функцию $T(p, \mathbf{x})$.

Следует подчеркнуть, что искомая передаточная функция $T(p, \mathbf{x})$ должна удовлетворять условиям физической реализуемости. Эти условия зависят от выбранного элементного базиса (*RLC*-цепи, *RC*-цепи и др.), структуры цепи (уравновешенные или незаземленные, неуравновешенные или заземленные цепи) и т. д. Для всех цепей коэффициенты полиномов знаменателя и числителя передаточной функции должны быть действительными. Поскольку проектируемые фильтры и корректоры относятся к ус-

тойчивым цепям, полюсы их передаточных функций ограничены левой полуплоскостью переменной P; полюсы на мнимой оси должны быть простыми. В общем случае пассивных RLC-цепей полюсы являются комплексными числами; полюсы пассивных RC-цепей — действительные. Если используются не только пассивные, но и активные элементы (активные RC-цепи), то полюсы могут быть комплексными. Для определенных классов цепей существуют ограничения на расположение нулей передаточной функции, значения постоянного множителя и т. д. Таким образом, задача аппроксимации должна решаться при ограничениях, выражающих условия физической реализуемости конкретного класса цепей.

Во многих практических случаях необходимые и достаточные условия физической реализуемости функции $F(\omega, \xi)$ могут быть выражены в виде системы линейных неравенств относительно элементов вектора ξ. При этом задача оптимизации

$$\max \Phi(\omega, \xi) = \min; \quad m \in \Omega,$$

где $\Phi(\omega, \xi) = P(\omega)\,|F_0(\omega) - F(\omega, \xi)|$, представляет собой задачу взвешенного чебышевского приближения, которая, в частности, сводится к последовательному решению систем линейных неравенств. Такие системы могут быть решены методом линейного программирования, применение которого не требует определения начального приближения.

Аналогично формулируется задача оптимальной аппроксимации — определения заданной фазо-частотной характеристики (ФЧХ) $B_0(\omega)$ реализуемой передаточной функции минимального порядка n с ФЧХ $B(\omega, x) = -\arg T(j\omega, x)$, удовлетворяющей условию

$$\max P_B(\omega)\,|B_0(\omega, -B(\omega, x)| \leqslant \Delta_B; \quad \omega \in \Omega.$$

Общие задачи оптимальной аппроксимации АЧХ и ФЧХ цепей могут быть конкретизированы для различных частных случаев, например для фильтров, фазовых контуров и др.

Наряду с чебышевским критерием наилучшего приближения в задачах аппроксимации часто применяется среднеквадратический критерий. Если передаточную функцию $T(p)$ представить в виде произведения

$$T(p) = \prod_k T_k(p),$$

где $T_k(p)$ — передаточная функция первого или второго порядка, то легко учесть условия физической реализуемости, а также другие возможные ограничения. В случае функции $T_k(p)$ второго порядка, т. е.

$$T_k(p) = H_{0k} \frac{p^2 + \dfrac{\omega_{0k}}{Q_{0k}} p + \omega_{0k}^2}{p^2 + \dfrac{\omega_k}{Q_k} p + \omega_k^2},$$

где H_{0k} — постоянный коэффициент; ω_{0k}, Q_{0k} и ω_k, Q_k — собственные частоты и добротности нулей и полюсов, условия физической реализуемости совпадают с условиями $\omega_k > 0$, $Q_k > 0$. Если, кроме того, полюсы должны быть комплексными, то $Q_k > 0{,}5$. При проектировании активных цепей часто по требованиям стабильности желательно ограничить добротность полюсов; тогда вводится дополнительное условие $Q_k \leqslant Q_{max}$. Могут быть также введены ограничения на расположение и добротность нулей.

Задача аппроксимации АЧХ $T_0(\omega)$, $\omega \in \Omega$ при среднеквадратическом критерии близости формулируется следующим образом. Найти вектор

$$\mathbf{x} = [H_0, \omega_{0\hat{1}}, Q_{0\hat{1}}, \omega_{\hat{1}}, Q_{\hat{1}}, \ldots, \omega_{n/2}, Q_{n/2}],$$

где H_0 — постоянный множитель передаточной функции $T(p)$, минимизирующий целевую функцию

$$\Phi_1(\omega, \mathbf{x}) = \sum_j w_j [T_0(\omega_j) - T(\omega_j, \mathbf{x})]^2,$$

где w_j — весовые коэффициенты, учитывающие вклад в целевую функцию слагаемых, соответствующих различным дискретным значениям частоты ω_j. Выше предполагалось, что функция $T(p)$ имеет четный порядок n и может быть представлена в виде $n/2$ сомножителей второго порядка $T_k(p)$; аналогично формулируется задача аппроксимации АЧХ в других случаях. Минимизация целевой функции $\Phi_1(\omega, \mathbf{x})$ производится при соответствующих ограничениях.

Задачи аппроксимации ФЧХ $B_0(x)$ или характеристики группового времени запаздывания (ХГВЗ) $\tau_0(\omega) = dB_0(\omega)/d\omega$ формулируются как задачи минимизации целевых функций

$$\Phi_2(\omega, x) = \sum_k w_k [B_0(\omega_k) - B(\omega_k, x)]^2,$$

или

$$\Phi_3(\omega, x) = \sum_l w_l [\tau_0(\omega_l) - \tau(\omega_l, x)]^2,$$

где w_k и w_l — весовые коэффициенты; $\tau(\omega, x)$ — ХГВЗ, соответствующая полученной передаточной функции $T(p)$.

Минимизация целевых функций $\Phi_i(\omega, x)$ производится методами нелинейного математического программирования, позволяющими найти локальный экстремум.

Методы нелинейного математического программирования позволяют также решать задачу одновременной аппроксимации АЧХ и ФЧХ или АЧХ и ХГВЗ. При этом целевая функция записывается в виде

$$\Phi(\omega, x) = k_1 \Phi_1 + k_2 \Phi_2$$

или

$$\Phi(\omega, x) = k_1 \Phi_1 + k_3 \Phi_3$$

где k_1 и k_2 — весовые коэффициенты.

Можно, кроме того, минимизировать стабильность передаточной функции к изменениям ее параметров. Для этого в целевую функцию следует ввести еще одно слагаемое, представляющее собой один из критериев стабильности передаточной функции, например:

$$\Phi_4 = \sum_n \sum_k w_n \left(S^{|T_k|}_{\omega_{0k}} + S^{|T_k|}_{\omega_k} \right)_{\omega = \omega_n},$$

где ω_n — весовые коэффициенты; $S^{|T_k|}_{\omega_{0k}}$ и $S^{|T_k|}_{\omega_k}$ — чувствительности АЧХ $|T_k|$ к изменениям собственных частот ω_{0k} и ω_k. Таким образом, общая задача оптимальной аппроксимации

сводится к минимизации многокритериальной целевой функции

$$\Phi(\omega, x) = \sum_i k_i \Phi_i.$$

Такая минимизация выполняется известными методами, например методом последовательных уступок.

При решении задач оптимизации на основе методов нелинейного программирования весьма важное значение имеет выбор хорошего начального приближения. В задачах аппроксимации АЧХ фильтров выбор можно осуществить с помощью классических методов аппроксимации (Чебышева, Золотарева—Кауэра и др.). При аппроксимации ХГВЗ фазовых корректоров также можно получить хорошее приближение для порядка передаточной функции и ее коэффициентов, базируясь на известных свойствах передаточной функции корректора второго порядка.

Задача определения оптимальных параметров схемы (задача параметрической оптимизации), как правило, также решается с помощью методов нелинейного программирования. При этом структура схемы получается в результате применения известных методов схемной реализации пассивных или активных цепей; кроме того, в ряде случаев структурой можно задаться на основании опыта решения аналогичных задач. Начальное значение параметров схемы, как правило, находится при условии идеальности схемных элементов. В частности, при синтезе *RLC*-схем вначале предполагается, что конденсаторы и индуктивные катушки не имеют потерь; расчет параметров *RC*-схем с активными элементами — операционными усилителями (ОУ) в некоторых случаях (когда параметры ОУ трудно учесть аналитически) производится в предположении идеальности ОУ. Поэтому возможно несовпадение требуемых и реализованных характеристик, например АЧХ и ФЧХ; при этом реализованные характеристики можно вычислить в результате анализа схемы с моделями элементов необходимой точности (с учетом потерь реактивных элементов; частотной зависимости коэффициента усиления, входных и выходных сопротивлений и емкостей ОУ и т. д.).

Таким образом, на этапе параметрической оптимизации может определяться вектор параметров элементов схемы $\mathbf{x}$ так, чтобы минимизировать целевую функцию — меру близости между заданной и реализованной характеристиками. При оптимизации в плоскости p (метод выравнивания коэффициентов) целевая функция имеет вид

$$\Phi(\mathbf{x}) = \sum_j (a_{0i} - a_i(\mathbf{x}))^2 + \sum_j (b_{0j} - b_j(\mathbf{x})^2,$$

где a_{0i}, b_{0j} — номинальные значения коэффициентов числителя и знаменателя передаточной функции (найденные в результате решения задачи аппроксимации); $a_i(\mathbf{x})$, $b_i(\mathbf{x})$ — реализованные коэффициенты передаточной функции (найденные в результате анализа схемы с учетом неидеальности схемных элементов).

Использование приведенной целевой функции возможно, если учет неидеальности схемных элементов не приводит к увеличению порядка сложности схемы и, следовательно, к увеличению степеней числителя и знаменателя передаточной функции. Это условие не выполняется, например, для *RC*-схем с ОУ при учете частотных зависимостей коэффициентов усиления усилителей. В таких случаях номинальная и реализованная передаточные функции имеют разный порядок и следует воспользоваться целевой функцией

$$\Phi(\omega, x) = k_1 \Phi_1 + k_2 \Phi_2,$$

где Φ_1 и Φ_2 аналогичны записанным выше функциям $\Phi_1(\omega, \mathbf{x})$ и $\Phi_2(\omega, \mathbf{x})$ и представляют собой среднеквадратическую меру близости между номинальными и реализованными АЧХ и ФЧХ. В частных случаях весовой коэффициент k_2 (или k_1) может быть равен нулю; вместо ФЧХ в целевой функции $\Phi(\omega, \mathbf{x})$ может учитываться ХГВЗ.

При проектировании *RC*-схем с активными элементами весьма целесообразно минимизировать чувствительность схемы к изменениям ее параметров; для этого можно минимизировать целевую функцию — один из критериев стабильности схемы, например:

$$\Phi_3 = \sum_l \sum_n w_l \left| S^T_{x_n} \right|^2_{\omega=\omega_l},$$

где $S^T_{x_n}$ — относительная чувствительность реализованной передаточной функции к изменению параметра схемы x_n при частоте $\omega=\omega_l$. Функция Φ_3 с весовым коэффициентом k_3 может быть введена в качестве слагаемого многокритериальной целевой функции $\Phi(\omega, x) = \sum_i k_i \Phi_i$; при этом наряду с минимизацией меры близости между номинальными и реализованными характеристиками будет минимизироваться также чувствительность схемы к изменениям параметров ее элементов.

Параметрическая оптимизация схемы выполняется, как правило, при ограничениях на параметры. Например, при проектировании активных *RC*-схем из технологических соображений ограничены минимальные и максимальные значения сопротивлений резисторов, т. е ограничения имеют вид:

$$x_{min} \leqslant x \leqslant x_{max},$$

или

$$x - x_{min} \geqslant 0 \text{ и } x_{max} - x \geqslant 0.$$

Поэтому задача параметрической оптимизации представляет собой задачу с ограничениями; она, в частности, может быть сведена к задаче без ограничений с помощью методов внутренних или внешних штрафных функций. После этого применяются известные методы безусловной минимизации.

Найденные оптимальные в указанном выше смысле параметры схемы могут рассматриваться как начальное приближение для последующего этапа оптимизации — этапа определения оптимальных параметров и допусков (так называемая задача центрирования и оптимального распределения допусков). При этом обычно оптимизируется целевая функция, представляющая собой функцию стоимости схемы, обусловленную допусками. Эта задача формулируется, например, как задача нелинейного программирования: минимизировать функцию стоимости $C(\mathbf{x}^0, \Delta\mathbf{x})$, где $\mathbf{x}^0$ — номинальный вектор параметров, $\Delta\mathbf{x}$ — вектор абсолютных

допусков, при выполнении условий работоспособности схемы, в частности условий, ограничивающих верхнее и нижнее значения отклонений частотных характеристик, обусловленных допусками, в дискретных точках ω_j рабочего диапазона частот. Если

$$\Delta F+(\omega_j) = F+(\omega_j) - F^0(\omega_j);$$
$$\Delta F^-(\omega_j) = F^0(\omega_j) - F-(\omega_j),$$

— допустимые значения верхнего и нижнего отклонений частотной характеристики относительно ее номинального значения $F^0(\omega_j)$, то условия работоспособности записываются в виде

$$\Delta F+(\omega_j) - \Delta F(\omega_j, \Delta x) \geqslant 0;$$
$$\Delta F-(\omega_j) + \Delta F(\omega_j, \Delta x) \geqslant 0,$$

где $\Delta F(\omega_j, \Delta x)$ — отклонения характеристики, обусловленные вектором допусков Δx, относительно характеристики при нулевых допусках.

Учет условий работоспособности весьма труден, поскольку эти условия должны выполняться во всем частотном диапазоне при изменениях вектора параметров в поле допуска. Область изменения вектора параметров можно представить в многомерном пространстве как многогранник с центром в точке x^0.

Решение задачи оптимального распределения допусков упрощается, если проверять условия работоспособности только в вершинах многогранника. При этом по существу решается задача определения допусков в режиме наихудшего случая, обеспечивающего 100 %-ный выход годных схем. Эта задача представляет собой задачу нелинейного программирования, решаемую, как правило, с помощью метода внутренних штрафных функций.

Режим наихудшего случая практически является маловероятным. Поэтому для определения оптимальных допусков применяются также различные методы оптимизации выхода годных схем как задачи оптимизации по статистическому критерию. В этом случае процесс оптимизации заключается в выборе начального вектора математических ожиданий параметров схемы и последующего его изменения, так чтобы обеспечить наибольший (но меньший 100 %) выход годных схем; в процессе оптимизации определяются также дисперсии на параметры, связанные с допусками. Особенностью оптимизации выхода годных схем является необходимость расчета статистических характеристик; такой расчет в общем случае выполняется с помощью метода статистических испытаний (метода Монте-Карло).

8.5. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР

Структура программного обеспечения

Программное обеспечение (ПО) САПР представляет собой организованный комплекс алгоритмов и программ с созданными на их основе пакетами прикладных программ (ППП), обеспечивающий процесс функционирования САПР. ПО САПР отличается от обычных программ или ППП тем, что это система, направленная на автоматизированное получение

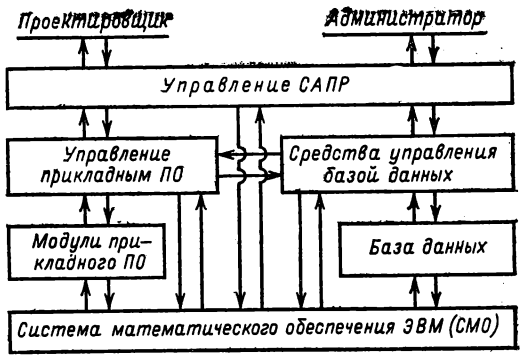


Рис. 8.10. Структура ПО САПР

проектных решений на различных этапах проектирования.

Общая структура ПО САПР основывается на иерархическом построении и включает следующие уровни:

средства операционной системы (ОС) ЭВМ и ППП общего применения;

средства управления базой данных САПР;

совокупность модулей прикладного ПО САПР, непосредственно выполняющих операции по преобразованию проектной информации;

программы, управляющие последовательностью выполнения модулей прикладного ПО в процессе получения проектных решений;

управляющие и диалоговые средства, обеспечивающие взаимосвязь между пользователями и САПР.

Структура организации ПО САПР базируется на программных средствах системы математического обеспечения (СМО) ЭВМ и схематично представлена на рис. 8.10.

Под СМО ЭВМ понимается совокупность программных средств регулярного и общего применения, повышающих эффективность применения ЭВМ и упрощающих ее техническую эксплуатацию. Основными компонентами СМО являются операционные системы (ОС), которые осуществляют главные задачи по организации взаимосвязанного функционирования отдельных устройств вычислительной системы и обеспечению связи между пользователями и ЭВМ в процессе решения задач. Для различных моделей ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ разработано несколько разновидностей ОС. В наибольшей степени для решения задач автоматизированного проектирования приспособлены системы ОС ЕС и ОС РВ. Так, ОС ЕС может управлять работой ЭВМ в различных режимах пакетной обработки, удаленной пакетной обработки, мультипрограммирования и разделения времени, а также обеспечивать работу ЭВМ в многопроцессорных и многомашинных конфигурациях.

Кроме операционных систем, в СМО входят пакеты прикладных программ, которые строятся на базе ОС и являются их развитием в конкретном направлении. ППП имеют самостоятельную документацию и не входят в состав ОС.

ППП являются более развитой формой прикладного ПО САПР. По своей организационной структуре ППП делятся на пакеты с простой и сложной структурными схемами.

ППП простой структуры (библиотеки программ) представляют собой наборы отдельных программ, предназначенных для решения некоторого класса задач. Каждая программа для своей работы не требует связей с другими программами пакета. Основное преимущество такой организации ПО состоит в возможности его расширения и совершенствования путем простого добавления новых программ. Однако здесь пользователь вынужден самостоятельно формировать необходимую конфигурацию программных модулей для решения своей задачи, что предъявляет повышенные требования к его квалификации в области программирования.

Основные эксплуатационные требования к ПО САПР (высокая степень автоматизации управления ПО, подготовки входных данных, а также удобство, простота и оперативность использования) удовлетворяются с помощью ППП сложной структуры, включающих в свой состав монитор (управляющую программу), библиотеку модулей, базу данных пакета, язык пакета.

Монитор обеспечивает управление функционированием ППП и общение пользователя с ним. Управление ППП понимается как организация последовательности выполнения программных модулей при решении проектных задач. Общение пользователей с ППП может быть обеспечено, например, с помощью специализированных диалоговых программных средств.

Библиотека модулей содержит программы для выполнения расчетных операций, трансляции описаний заданий, обслуживания базы данных пакета, сервисных функций и пр. Каждый модуль имеет, как правило, жесткую структуру, а необходимая гибкость использования модулей для решения различных задач достигается применением управляющих программ. Разделение ППП на управляющую и расчетную части позволяет во многих случаях упростить построение сложных программных комплексов.

База данных пакета представляет собой совокупность массивов данных, необходимых для выполнения проектных процедур, реализуемых с помощью пакета.

Язык пакета является средством описания объектов проектирования и управления выполнением проектной процедуры.

Программные средства, входящие в состав отдельных ППП, могут объединяться для решения различных задач проектирования. Для этих целей, а также для обеспечения взаимосвязи между пользователями и САПР используются специализированные программные средства управления САПР.

Пакеты прикладных программ схемотехнического проектирования электрических цепей

В настоящее время наибольшее применение получили ППП анализа электронных схем, а также анализа и оптимизации. Они предназначены в общем случае для анализа и оптимизации по различным критериям линейных схем в частотной и временной областях или нелинейных схем во временной области. Структура таких ППП обычно содержит пять основных блоков: ввода и сервисной обработки входной информации, формирования и расчета математической модели схемы, расчета выходных параметров, анализа и оптимизации.

Входной информацией служит описание принципиальной схемы на входном языке, которое сводится к описанию ее двухполюсных и многополюсных элементов (компонентная информация) и связей между ними (топологическая информация). В блоке ввода и сервисной обработки входной информации эта информация подвергается различным преобразованиям с целью контроля возможных ошибок, а также с целью представления информации в виде, наиболее удобном для ее последующей обработки.

Контролируются, например, такие ошибки пользователя, как пропуск или повторение номера узла, наличие изолированных узлов; кроме того, контролируются возможные ошибки в принципиальной схеме: наличие контуров из независимых источников ЭДС или сечений из независимых источников тока и т. д. При преобразовании входной информации формируются различные вспомогательные массивы, содержащие параметры элементов определенных классов, рассчитывается число однотипных элементов каждого класса, общее число параметров и т. д. Такое преобразование упрощает программирование и может уменьшить затраты оперативной памяти и времени вычислений.

В блоке формирования и расчета математической модели составляются и решаются уравнения схемы в соответствии с принятыми в программе методом анализа и методами численного решения уравнений. Здесь могут формироваться матричные коэффициенты уравнений состояния, расширенных узловых или узловых уравнений. Сформированные матричные коэффициенты используются для расчета временных и частотных характеристик линейных схем, статического и переходного режимов нелинейных схем.

В блоке расчета выходных параметров вычисляются требуемые выходные параметры схемы — полоса пропускания и коэффициент прямоугольности АЧХ фильтров, длительности фронтов, задержки импульсов выходных напряжений и т. д. После расчета выходных параметров в зависимости от задания может выполняться их анализ или оптимизация.

В блоке анализа осуществляется анализ выходных параметров схемы при воздействии различных дестабилизирующих факторов (температуры, радиации и др.).

В блоке оптимизации осуществляется параметрическая оптимизация схем по заданным критериям и при известных ограничениях на параметры. Оптимизация требует многократного формирования и расчета математической модели схемы.

Рассмотренную структуру имеют пакеты программ анализа и оптимизации электронных схем АРОПС и СПРОС. Пакет программ СПАРС также позволяет осуществлять анализ и оптимизацию линейных и нелинейных электронных схем. Подобные задачи решаются пакетами программ ПАУМ2, ПА4 и др.

ППП, предназначенные для проектирования частотно-избирательных цепей, кроме того, содержат программы аппроксимации в общем случае частотных и временных характери-

стик, а также программы расчета номиналов параметров с учетом технологических ограничений. При оптимальном проектировании ППП должны содержать также программы центрирования и оптимального распределения допусков на параметры.

8.6. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАК ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ СИСТЕМЫ

Основные сведения

Принципиально можно представить полную автоматизацию проектирования, в результате которой на основании исходных условий на проектирование можно получить полный проект заданного объекта с чертежами, выполненными на ЭВМ, спецификацией, сметной стоимостью и т. д. Такие разработки существуют для отдельных электротехнических устройств. Однако для проектирования систем электроснабжения такое решение нереализуемо и можно ориентироваться только лишь на человеко-машинную систему проектирования, в которой отдельные задачи (их может быть много и они могут быть весьма сложными) решаются ЭВМ, а стыковку решений, корректировку отдельных вариантов, окончательный выбор проектного решения осуществляет проектировщик или, как часто его называют, лицо, принимающее решение.

Действительно, создание любой, достаточно сложной системы (а именно такой является система электроснабжения) невозможно поставить и решать как единую задачу по одному четко определенному критерию. Система электроснабжения является многоцелевым объектом, должна удовлетворять ряду часто взаимно противоречивых требований: экономичности, качеству электроэнергии, доставляемой потребителю, надежности электроснабжения (этот фактор в последнее время часто вводят в виде одного из компонентов показателей качества электроэнергии), удобству и простоте эксплуатации, работоспособности в особых условиях (при ремонтах, в военное время и т. п.), способности к развитию с учетом возможности увеличения нагрузок, подключения новых линий и источников электроэнергии и т. д. Учет всех этих, а также и других специфических условий (например, экологических) приводят к тому, что первоначальное требование наивысшей экономичности системы электроснабжения приходится снижать. Например, если один потребитель может быть обеспечен электроэнергией по двухцепной линии без выключателей на высшей стороне трансформаторов (по блочной схеме), то учет необходимости дальнейшего развития сети приводит к отказу от такой очень простой и дешевой схемы. Такие примеры не единичны, а главное, в совокупности они чрезвычайно трудно формализуются. Решать такие задачи в рамках существующих математических моделей очень трудно, а когда факторов много — практически невозможно. Поэтому в таких ситуациях необходимо привлекать специалистов, обладающих содержательными знаниями об оборудовании, его характеристиках, об условиях, в которых намечается работа проектируемой системы, об опыте эксплуатации и проектирования. Эти обстоятельства и определяют уровень, характер подхода к реализации систем автоматизированного проектирования электроснабжения, в которых проектировщик, обладающий высокой квалификацией, несмотря на самое широкое использование вычислительной техники, играет основную роль. Функции проектировщика при этом состоят не только в подготовке исходной информации для процесса проектирования, что имеет, конечно, решающую роль, но и в корректировании вариантов расчета (это имеет важнейшее значение для экономного использования дорогого вычислительного времени), а также и в окончательном принятии решения, как указывалось выше.

Таким образом, САПР электроснабжения в настоящее время не является какой-либо замкнутой системой программ и это, по-видимому, главное свойство рассматриваемого вопроса, в значительной степени учитывающее его полную характеристику. В соответствии с этим ниже рассматривается технологическая схема проектирования систем электроснабжения, применительно к системе электроснабжения промышленных предприятий на основе [8.37], технологическая схема проектирования развития предприятий электрических систем [8.38, 8.39], в которых дается характеристика места применения ЭВМ; приводятся ряд программных комплексов. Здесь следует оговориться, что программы и алгоритмы решения различных задач проектирования постоянно совершенствуются, расширяются возможности математической формализации и вычислительных средств, средств хранения и отображения информации, потому приводимые ниже программные комплексы следует рассматривать как иллюстрации, а не как рекомендации к применению и не как полный, исчерпывающий обзор разработок по рассматриваемому вопросу.

Технологическая схема проектирования системы электроснабжения промышленного предприятия и применение ЭВМ при решении задач проектирования

Процесс проектирования электроснабжения подразделяется на ряд основных этапов:

проектирование внутризаводской системы электроснабжения;

проектирование главных понижающих подстанций;

проектирование внешнего электроснабжения промышленного предприятия;

проект внутрицехового электроснабжения.

Заметим здесь, что проектирование внешнего электроснабжения промышленного предприятия в определенной степени является частью другой системы автоматизированного проектирования — САПР развития предприятия электрических сетей, которое будет рассмотрено ниже. В данном разделе внутрицеховое электроснабжение также не рассматривается в силу исключительно широкого разнообразия условий такого электроснабжения.

Технологическая схема проектирования внутризаводской системы электроснабжения на напряжении 10—(6) кВ может быть укрупненно представлена из следующих этапов [8.37]:

1. Формулировка исходных данных на проектирование, получение генплана предприятия, технических условий от энергосистемы, определение категорий производств, типов оборудования, условий и требований к охране окружающей среды.

Этот этап в настоящее время невозможно включить в САПР, хотя отдельные элементы этапа должны находить все большее и большее внедрение в проектных организациях в качестве банков исходных данных по типам оборудования, категориям производств, экономическим вопросам и методам выработки условий и ограничений, вытекающих из требований к защите окружающей среды. Разработки по банкам данных существуют, имеются принципиальные исследования по методам их организации и использования. Слабо развиты алгоритмы и программы по оценкам экологического влияния производств на окружающую среду. Существуют программы по оценке влияния на окружающую среду тепловых электростанций и, в частности, ТЭЦ, которые могут быть расположены на территории промышленных предприятий либо вблизи них; требуются углубленные проработки и создание достаточно общих алгоритмов для комплексного учета всех факторов.

Наибольшая сложность автоматизации этого этапа состоит в необходимости увязок всех исходных данных на проектирование, их уточнения, так как зачастую они содержат противоречивые данные, ошибочные сведения, которые невозможно в полной мере выявить формальными методами с помощью ЭВМ. Поэтому на этом этапе основным исполнителем является проектировщик, однако необходимо отметить, что результаты его работы должны быть максимально увязаны с задачами дальнейшего применения ЭВМ.

2. Формирование вариантов схем электроснабжения. Задаются положения источников питания и, может быть, системы канализации электроэнергии, а в случае применения токопроводов — и трасса токопровода.

В силу сложности алгоритмизации этот этап в общем случае выполняется проектировщиком. В отдельных случаях он может опираться на результаты работы системы автоматизированного проектирования электрических сетей энергосистемы, на территории которой располагается промпредприятие. Но поскольку в настоящее время проектирование электроснабжения промпредприятий ведется различными министерствами, то вопросы стыковки программного обеспечения рассматриваемых вопросов не разработаны. В отдельных публикациях высказывались мнения и предложения о необходимости создания единой научной концепции проектирования развития энергосистем и проектирования систем электроснабжения промышленных предприятий. Но в настоящее время до реализации этих концепций в программных модулях САПР еще далеко.

3. Электрические расчеты вариантов электроснабжения. На этом этапе выполняются следующие работы:

расчет электрических нагрузок по цехам с определением числа трансформаторных подстанций (ТП), расчет нагрузок по ТП с учетом компенсации реактивной мощности нагрузки;

расчеты электрических нагрузок по распределительным пунктам (РП), формирование схем РП, расчет электрических нагрузок по ТП, РП, ГПП (главным понижающим подстанциям), выбор количества ГПП, выбор числа и мощности трансформаторов ГПП;

определение местоположения РП и ГПП на генеральном плане; формирование схемы внутризаводского электроснабжения, расчет сечений кабелей, корректировка схемы;

расчет электрических параметров сети, токов коротких замыканий, выбор способов пуска электродвигателей, проверка кабелей по термической стойкости и уточнение их сечений, выбор способов ограничения токов КЗ, расчет самозапуска двигателей и мероприятий по их обеспечению; корректировка сети системы электроснабжения;

расчет уровней напряжений в электрической сети в нормальных и послеаварийных режимах, проверка пределов изменений регулирования под нагрузкой трансформаторов ГПП и регуляторов возбуждения синхронных генераторов ТЭЦ;

расчет качества электроэнергии, корректировка схемы сети, выбор средств и места расположения фильтрокомпенсирующих, симметрирующих устройств; корректировка сети в связи с возможной необходимостью повышения качества электроэнергии;

окончательный расчет электрических нагрузок с расчетом потерь энергии в сети, их стоимости, показателей качества электроэнергии.

Все расчеты этапа 3 выполняются с помощью ЭВМ, но в силу необходимости внесения корректировок в схемы (например, включения реакторов для ограничения токов КЗ, или разделения спокойных и резкопеременных нагрузок для обеспечения требуемого качества электроэнергии) полностью автоматизировать весь этап невозможно, поэтому этап 3 обеспечивается комплексом программ, согласованных по информационной базе и методами вывода результатов.

4. Расчет надежности отдельных частей и всей системы электроснабжения в целом. В настоящее время существует несколько промышленных программ, позволяющих проводить расчет надежности довольно сложных систем электроснабжения (ВНИИЭ, МЭИ и др.).

5. Определение технико-экономических показателей вариантов, вычерчивание вариантов схем электроснабжения (выполняются ЭВМ). Сравнение вариантов и выбор оптимального осуществляется лицом, принимающим решение.

6. Расчет тока однофазного замыкания на землю и выбор способа размещения нейтрали (выполняется ЭВМ).

7. Расчет релейных защит сетей и построение зон селективности работы защит (выполняется ЭВМ).

8. Формирование спецификации, определение сметной стоимости на строительство и т. п. (выполняется ЭВМ).

9. Составление пояснительной записки, оформление проектной документации (выполняется проектировщиком).

Из проведенного перечисления видно, что подавляющая часть работы по проектированию систем электроснабжения может быть с различной степенью полноты выполняться на ЭВМ. Однако без непосредственного участия специалистов высокой квалификации, которые корректируют решение задач, процесс невозможен.

Прежде всего необходимы повышение эффективности информационного обеспечения, обеспечение регулярной коррекции постоянной информации, используемой при проектировании, оптимизация банка исходных данных, что представляет собой достаточно сложную задачу, требующую постоянного обслуживания и, по-видимому, в принципе неподдающуюся автоматизации в силу необходимости экспертной оценки целесообразности изменения, уточнения или расширения объема исходных данных в связи с научно-техническим прогрессом в областях, связанных с проектированием систем электроснабжения.

Другое направление развития автоматизированного проектирования связано с развитием методов машинной обработки информации смешанного типа: числовой, логической и семантической.

Надо отметить, что аппарат эффективного сочетания числовых и логических переменных в настоящее время достаточно хорошо развит, однако в системах автоматизированного проектирования электроснабжения в полной мере пока не применяется. Вместе с тем его использование может существенно расширить возможности применения САПР.

Наконец, надо отметить необходимость для более обоснованного принятия решения по проектам учитывать неопределенность исходной информации непосредственно в самих методах проектирования, расчетах режимов, технико-экономических показателей. В этом направлении разработки ведутся как по учету исходной информации в вероятностной форме задания, так и по учету неопределенности исходной информации методом теории нечетких множеств (НЭТИ, МЭИ, КПИ и др.). Ниже дается описание одного из таких комплексов, который может служить модулем САПР.

Технологическая схема непрерывного проектирования развития предприятий электрических сетей, применение ЭВМ при решении задач проектирования

Проектирование распределительных сетей электроэнергетических систем имеет следующую последовательность [8.38, 8.39]:

1) обследование состояния, сбор исходных данных и прогноз роста нагрузок, учет появления новых потребителей электроэнергии и новых источников;

2) определение нагрузок, расчетных мощностей на подстанциях сети;

3) разработка вариантов развития сети;

4) оценка вариантов по надежности и их корректировка;

5) электрические расчеты нормальных режимов и корректировка схем вариантов по результатам расчетов;

6) разработка вариантов аварийных режимов и проведение расчетов электрических режимов для послеаварийного состояния сети, корректировка схем по результатам послеаварийных расчетов;

7) расчеты релейной защиты элементов сети с построением зон селективности;

8) определение технико-экономических показателей вариантов развития сети и выбор оптимального варианта;

9) составление документации, планов линий, схем, спецификации и т. п.

Как и в предыдущем разделе, первый этап проектирования выполняется проектировщиком, задача автоматизированного проектирования в этой части состоит в организации автоматизированного банка исходных данных, которые должны регулярно уточняться и расширяться в соответствии с модернизацией оборудования, ростом нагрузок, введением новых электростанций, изменением конфигурации сети и т. п.

Прогноз нагрузок выполняется с учетом естественного прироста нагрузок во времени, развития отраслей промышленности данного узла нагрузки; важно учитывать подключение конкретных крупных потребителей электроэнергии. Анализ нагрузок производится по узлам сети, для которых важно организовать хранение информации о графиках нагрузки. В настоящее время в энергосистемах существует ретроспективная информация о нагрузках наиболее мощных узлов. Интересно отметить, что наблюдается достаточно тесная корреляция режимов сети с графиками нагрузок узлов, что может быть использовано для построения простых прогнозов для мощностей ветвей сети при предпроектной оценке вариантов. Но такие разработки пока не нашли внедрения в практику проектирования.

В настоящее время разработаны программные комплексы, позволяющие проводить расчеты режимов по вероятностным характеристикам мощностей узлов и параметров сети (см. ниже), поэтому и банки исходных данных целесообразно снабжать подобной информацией. В этом же направлении идут разработки методов проектирования на основе теории размытых множеств, однако пока отработанных алгоритмов такого типа не зарегистрировано.

Определение расчетных нагрузок на подстанциях сети реализовано программным образом и не представляет затруднений.

Существуют алгоритмы генерации вариантов развития сети, поэтому третий этап проектирования в принципе может быть полностью автоматизирован, но, как показывает опыт работы с такими программами, машинный набор вариантов развития сети зачастую оказывается весьма широким, что значительно удлиняет процесс проектирования. Привлечение на этом этапе опытного программиста позволяет многократно уменьшать время счета при разработке реальных вариантов.

Существующие программы анализа надежности вариантов сети основываются на типовой информации об аварийных отключениях элементов электрической сети. В выходной информации выдается количество ТП, оставшихся без питания, и суммарный недоотпуск электроэнергии. По данным расчета надежности целесообразна корректировка вариантов развития сети, которая может быть проведена проектировщиком; в отдельных случаях кор-

ректировка может быть осуществлена уже на уровне разработки вариантов.

Расчеты установившихся режимов распределительной сети производятся для двух характерных режимов года (зимнего и летнего). Для расчетов используются те же программы, что при расчетах основной сети. Кроме того, в ряде организаций разработаны и специализированные программы, в частности применительно к малым ЭВМ. Характерные параметры таких программ: 300 пунктов (трансформаторных и распределительных), получающих питание от одного источника или центра питания, 400 участков (из них 50 могут входить в замкнутые контуры), 60 типовых графиков нагрузки. Исходная информация: схема сети 10(6)—35 и 0,4 кВ с заданными параметрами (длины кабеля, тип, марка провода), тип и мощность трансформаторов 10(6)—35/0,4 кВ, графики напряжения и токов источников питания, типовые суточные графики нагрузок и нагрузки отходящих от ТП линий 0,4 кВ, используемые ответвления трансформаторов [8.41].

Расчеты защиты предусматривают выбор предохранителей для ТП 10(6)/0,4 кВ и линий 0,4 кВ, расчет уставок защит трансформаторов и линий по типовым алгоритмам и построение зон селективности действия защит для оценки их эффективности. На основе таких расчетов могут быть проведены корректировки вариантов развития сети. Наконец, необходимо выполнить расчет емкостных токов в отдельных участках сети и оценку необходимости мер по компенсации токов простых замыканий на землю.

Описание программных комплексов, применяемых при автоматизированном проектировании

Количество работающих программ и программных комплексов для анализа режимов и проектирования систем электроснабжения настолько велико, что полный их обзор практически невозможен. Чрезвычайно затруднительно их сопоставление, так как разработаны такие программы на разных алгоритмических языках, для различных условий, при различающихся допущениях. Поэтому ниже приводятся в качестве иллюстрации характеристики ряда комплексов.

1. Комплекс программ для расчета сечений кабельной сети 1—35 кВ. Комплекс разработан на алгоритмическом языке ПЛ/1 применительно к операционной системе электронных вычислительных машин ЕС, состоит из 11 программных модулей и 8 машинных справочников, хранящихся во внешнем запоминающемся устройстве. Необходимый для функционирования объем оперативной памяти составляет 134 Кбайт. Время расчета контрольного примера (100 кабелей) не более 10 мин. Время подготовки исходной информации для упомянутого контрольного примера 3,5 ч. Машинные справочники содержат всю необходимую информацию по номенклатуре кабелей.

Комплекс снабжен диагностической подпрограммой для выявления ошибок в исходной информации. Для ускорения работы программы в комплексе реализована идея адаптивного справочника, которая позволяет с каждым новым расчетом уменьшать число обращений к внешним запоминающим устройствам. Комплекс разработан во ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект».

2. Системное объединение модулей подсистемы «Электроснабжение», которое включает в себя следующие программы, автоматизирующие основные и наиболее трудоемкие расчеты, выполняемые при проектировании электрических сетей промышленных предприятий напряжением 1 кВ и выше:

расчеты электрических нагрузок;

формирование схемы электроснабжения объекта и схем низкого напряжения главной понизительной подстанции промпредприятия:

расчет надежности схемы электроснабжения;

расчеты по выбору высоковольтных кабелей;

выбор числа и мощности трансформаторов ГПП;

расчет уставок защит элементов системы электроснабжения.

Объединение программ в систему позволяет при однократном вводе исходной информации получать конечный результат в виде необходимой проектной документации.

Алгоритмы и программы разработаны на основе руководящих указаний и норм на проектирование электрической части промпредприятий. За основу информационного обеспечения приняты каталоги Информэнерго, номенклатура заводов изготовителей, номенклатура Главэлектромонтажа и типовые проекты ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект».

Программы разработаны на языке ПЛ/1 применительно к операционной системе ОС ЕС. Пользователь имеет возможность корректировать схемы, полученные на ЭВМ. Разработчик — ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект».

3. Комплекс программ вероятностного расчета и оптимизации установившегося режима электрической системы.

В Новосибирском электротехническом институте разработан и внедрен в энергосистеме программный комплекс расчета установившегося режима сложной электрической сети при вероятностном задании исходной информации и оптимизации источников реактивной мощности и коэффициентов трансформации регулируемых под нагрузкой трансформаторов.

Комплекс предназначен для использования в САПР и автоматизированных системах диспетчерского управления любых электроэнергетических систем, для этого он обладает расширенной системой ввода и вывода исходной информации, позволяющей вводить данные и с перфокарт, и с магнитных дисков.

Предусмотрена возможность работы программы в режиме «дооптимизация», что значительно сокращает общее время работы.

Для расчета режима системы в качестве исходной информации используются математические ожидания и среднеквадратические отклонения активных и реактивных мощностей в нагрузочных узлах, активных мощностей и модулей векторов напряжений в опорных узлах, активных и реактивных сопротивлений и проводимостей линий электропередач и трансформаторов, реакторов и статических конденсаторов, установленных на подстанциях и электростанциях системы.

Математическая модель для вероятностного расчета установившегося режима позволяет учитывать коррелированность нагрузок узлов, связанных между собой электрически, а также коррелированность в каждом узле активной и реактивной мощностей.

Детерминированный расчет является частным случаем вероятностного расчета, когда все среднеквадратические отклонения исходных данных задаются нулевыми.

В результате расчета получаются математические ожидания, среднеквадратические отклонения напряжений в узлах сети, активных и реактивных мощностей в ветвях, необходимых мощностей источников реактивной мощности, потерь активной и реактивной мощности в сети. Кроме того, оцениваются вероятности выхода указанных параметров за технические (и технологические) ограничения, вероятности дефицита реактивной мощности в местах установок компенсирующих устройств.

Комплекс выдает результаты расчета на АЦПУ, МД и дисплей, составлен на языке ФОРТРАН, требуемый объем памяти 256 Кбайт, максимальный объем сети 300 узлов, 450 ветвей. Источники реактивной мощности оптимизируются в 50 узлах.

4. Алгоритм и программа автоматизированного расчета показателей качества электроэнергии в электрической сети промышленного предприятия.

Составлены на алгоритмическом языке ПЛ/1 в операционной системе ОС ЕС ЭВМ, позволяют рассчитывать показатели несинусоидальности напряжений и токов в сетях электроснабжения промышленных предприятий с вентильными нагрузками.

По алгоритму выполняются расчеты гармоник по всем комбинациям режимов вентильных преобразователей, заданных проектировщиком, определяется и вероятность возникновения каждой комбинации.

Расчет по этой программе показателей несинусоидальности для крупных систем электроснабжения с большим числом источников несинусоидальностей требует не более 17 мин на ЭВМ ЕС-1022. Число комбинаций режимов, объем рассчитываемой схемы (число узлов и ветвей), число рассчитываемых гармоник ограничивается только памятью машины.

Список литературы

8.1. **ГОСТ 22487-77.** Проектирование автоматизированное. Термины и определения.

8.2. **ГОСТ 23501.0-79.** Системы автоматизированного проектирования. Основные положения.

8.3. **ГОСТ 23501.7-80.** САПР. Предпроектные исследования.

8.4. **ГОСТ 23501.2-79.** Системы автоматизированного проектирования. Разработка, согласование и утверждение технического задания.

8.5. **ГОСТ 23501.5-80.** Системы автоматизированного проектирования. Эскизный проект.

8.6. **ГОСТ 23501.6-80.** Системы автоматизированного проектирования. Технический проект.

8.7. **ГОСТ 23501.4-79.** Системы автоматизированного проектирования. Общие требования к программному обеспечению.

8.8. **ГОСТ 23501.9-80.** Системы автоматизированного проектирования. Общие требования к банкам данных.

8.9. **ГОСТ 23501.8-80.** Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначения.

8.10. **ГОСТ 19002-80.** Схемы алгоритмов и программ. Правила выполнения.

8.11. **ГОСТ 19003-80.** Схемы алгоритмов и программ. Обозначения условные графические.

8.12. **ГОСТ 23501.15-81.** Системы автоматизированного проектирования. Ввод в действие.

8.13. **ГОСТ 23501.16-81.** Системы автоматизированного проектирования. Диалоговые средства. Общие требования.

8.14. **Аветисян Дж. А., Соколов В. С., Хан В. Х.** Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. М.: Энергия, 1976, 208 с.

8.15. **Батищев Д. И.** Поисковые методы оптимального проектирования. М.: Советское радио, 1975. 216 с.

8.16. **Геминтерн В. И., Каган Б. М.** Методы оптимального проектирования. М.: Энергия, 1980. 160 с.

8.17. **Гиродвигатели/Ю. В. Арбузов, Б. А. Делекторский, В. Б. Никаноров и др.; Под ред. И. Н. Орлова.** М.: Машиностроение, 1983. 176 с.

8.18. **Глориозов Е. Л., Ссорин В. Г., Сыпчук П. П.** Введение в автоматизацию схемотехнического проектирования. — М.: Советское радио, 1974. 224 с.

8.19. **Ильин В. Н.** Основы автоматизации схемотехнического проектирования. М.: Энергия, 1979. 392 с.

8.20. **Ионкин П. А., Миронов В. Г.** Синтез RC-схем с активными невзаимными элементами (вопросы реализации). М.: Энергия, 1976. 240 с.

8.21. **Синтез** линейных электрических и электронных цепей (метод переменных состояния)/П. А. Ионкин, Н. Г. Максимович, В. Г. Миронов и др. Львов: Изд-во при Львовском госуниверситете, 1982. 312 с.

8.22. **Копылов И. П.** Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах (электрические машины). М.: Высшая школа, 1980. 256 с.

8.23. **Калниболотский Ю. М., Казанджан Н. Н., Нестер В. В.** Расчет чувствительности электронных схем. Киев: Техника, 1982. 176 с.

8.24. **Ланнэ А. А.** Оптимальный синтез линейных электронных схем. М.: Связь, 1978. 336 с.

8.25. **Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А.** Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. — М.: Высшая школа, 1980. 359 с.

8.26. **Моделирование** и оптимизация на ЭВМ радиоэлектронных устройств. Под ред. З. М. Бененсона. — М.: Радио и связь, 1981. 272 с.

8.27. **Норенков И. П., Маничев В. Б.** Системы автоматизированного проектирования электронной и вычислительной аппаратуры. М.: Высшая школа, 1983. 272 с.

8.28. **Орлов И. Н., Архипов О. Г., Маслов С. И.** Принципы построения и практическая реализация на ЦВМ стохастической математической модели электрической машины. — Электричество, 1976, № 4, с. 73—76.

8.29. **Подиновский В. В., Гаврилов В. М.** Оптимизация по последовательно применяемым критериям. М.: Советское радио, 1975. 192 с.

8.30. **Сигорский В. П., Петренко А. И.** Алгоритмы анализа электронных схем. М.: Советское радио, 1976. 608 с.

8.31. **Слинченко В. Г.** Организация системы автоматизированного проектирования электронных схем на ЭВМ. Киев: Вища школа, 1978. 176 с.

8.32. **Терзян А. А.** Автоматизированное проектирование электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.

8.33. **Графические** средства автоматизации проектирования РЭА/Д. И. Томашевский, Г. Г. Масютин, А. А. Явич, В. В. Преснухин М.: Советское радио, 1980. 244 с.

8.34. **Трифонов И. И.** Синтез реактивных цепей с заданными фазовыми характеристиками. М.: Связь, 1969. 216 с.

8.35. **Фиакко А., Мак-Корник Г.** Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации. М.: Мир, 1972. 240 с.

8.36. **Химмельблау Д.** Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 532 с.

8.37. **Васин В. П., Цовьянов А. Н.** Элементы теории и методы автоматизированного проектирования в электроэнергетике. М. : Изд-во МЭИ, 1982. 60 с.

8.38. **Проектирование** промышленных электрических сетей/Под ред. В. И. Круповича. М.: Энергия, 1979. 328 с.

8.39. **Разработка** математического обеспечения ОАСУ «Энергия». Кишинев: Штиинца, 1973. 178 с.

8.40. **Маркушевич Н. С.** Автоматизированное управление режимами электросетей 6—20 кВ. М.: Энергия, 1980. 208 с.

8.41. **Применение** ЭВМ для автоматизации технологических процессов в энергетике/М. А. Беркович, Г. А. Дорошенко, У. К. Курбагалиев и др.; Под ред. В. А. Семенова. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

Раздел 9

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИСПОЛНЕНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

9.1. Стандартизация и унификация в электротехнической промышленности . . . 260
Применение государственной системы стандартизации (260). Категории и виды стандартов (260). Унификация электротехнических изделий (261).
9.2. Главные параметры электрических сетей и присоединяемого к ним оборудования . 263
Общие положения (263). Ряды номинальных постоянного и переменного напряжений (263). Номинальные частоты (264). Ряд номинальных токов (265).
9.3. Защита электрооборудования от внешних воздействий 266
Степени защиты электротехнических изделий, обеспечиваемые оболочками (266). Степени защиты электрических машин (266). Степени защиты электрических аппаратов (267). Общие положения о воздействии механических и климатических факторов внешней среды на электротехнические изделия в условиях эксплуатации (267). Технические требования по климатическим воздействиям (268). Технические требования по механическим воздействиям (271). Электротехнические изделия для районов с тропическим и холодным климатом (273). Испытания электротехнических изделий на стойкость к воздействию климатических и механических факторов внешней среды (273).
9.4. Классификация и кодирование электротехнической продукции 274
9.5. Стандартизация терминов и обозначений 275
9.6. Надежность и техническое обслуживание электротехнических изделий . . . 276
9.7. Расчет показателей надежности электротехнических изделий 277
Показатели надежности невосстанавливаемых систем (277). Показатели надежности восстанавливаемых систем (278). Выбор законов распределения наработки до отказа и времени восстановления электротехнических изделий (279). Расчет надежности невосстанавливаемых систем (280). Расчет надежности резервированных изделий (286). Расчет надежности изделий с зависимыми элементами (287). Марковский метод расчета надежности систем (287).
Список литературы 291

9.1. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УНИФИКАЦИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Применение государственной системы стандартизации

Стандартизация в электротехнической промышленности полностью строится на базе государственной системы стандартизации (ГСС).

В технической нормативной документации электротехнической промышленности нашли применение все категории и виды стандартов, предусмотренные в государственной системе стандартизации. Основой нормативно-технической документации в отрасли являются государственные стандарты.

В электротехнической промышленности сложилась система стандартизации, заключающаяся в том, что стандарты всех подотраслей электротехники (их более 30) основываются на общих стандартах для всего машиностроения (предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел, допуски и посадки, номенклатура и характеристики основных показателей качества продукции и др.) и на общих стандартах для всей электротехники (номинальные напряжения, номинальные частоты, нормы качества электроэнергии у ее приемников, условия эксплуатации электрооборудования в части воздействия климатических и механических факторов внешней среды, а также в районах с холодным или тропическим климатом, стандарты на термины и определения, относящиеся ко всей электротехнике, и на буквенные обозначения основных величин в электротехнике).

Кроме того, в основу стандартизации продукции большинства подотраслей электротехнической промышленности — электрических машин, трансформаторов, электрических аппаратов, источников света и многих других — положены базовые стандарты, общие для всей подотрасли; так, для электрических машин имеется стандарт ГОСТ 183-74, устанавливающий общие технические требования на все электрические машины; имеются и другие стандарты, устанавливающие общие нормы для всех машин. На основе единых общих стандартов для изделий всей подотрасли утверждаются стандарты на единые серии изделий данной подотрасли, например на асинхронные электродвигатели, синхронные и др. При этом одновременно производится унификация узлов и деталей для данной серии электродвигателей. Кроме того, устанавливаются определенная комплексность и последовательность стандартизации изделий, комплектующих элементов для них и материалов.

Подобным образом построена стандартизация в остальных подотраслях электротехники — в трансформаторостроении, электроаппаратостроении, в светотехнике и др.

Категории и виды стандартов

В соответствии с ГОСТ 1.0-68 установлено, что стандарты СССР подразделяются на следующие категории:

государственные стандарты Союза ССР (ГОСТ);

отраслевые стандарты (ОСТ);

республиканские стандарты (РСТ);

стандарты предприятий (СТП).

Стандарты в Советском Союзе являются обязательными в пределах установленной сферы их действия, области и условий их применения.

Государственные стандарты устанавливаются преимущественно на продукцию массово-

го и крупносерийного производства, на изделия и продукцию, имеющие важное народнохозяйственное значение, и другие объекты, установление которых необходимо для обеспечения оптимального качества продукции, единства и взаимосвязи различных областей науки, техники, производства, культуры и др.

Отраслевые стандарты устанавливают требования к продукции, не относящиеся к объектам государственной стандартизации, к технологической оснастке, инструменту, специфическим для отрасли, технологические нормы и типовые технологические процессы отраслевого применения, а также нормы, правила, требования, термины и обозначения, необходимые для обеспечения взаимосвязи в производственно-технической деятельности предприятий и организаций отрасли.

Кроме того, в отраслевых стандартах устанавливаются основные положения и требования в области организации производства и управления качеством продукции, нашедшие широкое применение в последнее время.

Порядок разработки и утверждения государственных и отраслевых стандартов установлен в ГОСТ 1.2-68.

Республиканские стандарты устанавливают требования к продукции, выпускаемой предприятиями союзного, республиканского и местного подчинения, за исключением продукции, относящейся к объектам государственной или отраслевой стандартизации. Номенклатура продукции, на которую утверждают республиканские стандарты, согласовывается с Госстандартом СССР и с соответствующими ведущими министерствами (ведомствами) СССР по закрепленным группам продукции.

Порядок разработки и утверждения республиканских стандартов союзных республик установлен в ГОСТ 1.3-68.

Стандарты предприятий (объединений) устанавливают нормы, правила, требования, методы и другие объекты стандартизации, применяемые только на данном предприятии в данном объединении.

В частности, объектами стандартизации на предприятии могут быть:

детали и сборочные единицы, являющиеся составными частями изделий;

технологическая оснастка и инструмент, технологические нормы, требования и типовые технологические процессы и др.

На поставляемую продукцию стандарты предприятий (объединений) не утверждаются, и в конструкторской документации основного производства не допускается давать ссылку на стандарты предприятий (объединений).

Порядок разработки и утверждения стандартов предприятий устанавливается ГОСТ 1.4-68.

Основные требования к построению, содержанию и изложению стандартов установлены в ГОСТ 1.5-68.

Кроме приведенных категорий стандартов в электротехнической и других отраслях промышленности утверждаются технические условия (ТУ), представляющие собой распространенный вид нормативно-технической документации. Общий порядок согласования, утверждения и государственной регистрации ТУ на изделия, материалы, вещества и другую продукцию общепромышленного применения и народного потребления всех отраслей народного хозяйства, кроме продукции оборонного назначения, установлен ГОСТ 2.115-70.

Построение, изложение и оформление технических условий осуществляются в соответствии с правилами, установленными ГОСТ 2.114-70.

Понятие «вид стандарта» определяет содержание стандарта в зависимости от его назначения.

Стандарты всех категорий на продукцию согласно ГОСТ 1.0-68 подразделяются на виды:

стандарты технических условий (общих технических условий);

стандарты общих технических требований (технических требований);

стандарты параметров и (или) размеров;

стандарты типов, основных параметров и (или) размеров;

стандарты конструкций и размеров;

стандарты марок;

стандарты сортамента;

стандарты правил приемки;

стандарты методов контроля (испытаний, анализа, измерений);

стандарты правил маркировки, упаковки, транспортирования и хранения;

стандарты правил эксплуатации и ремонта;

стандарты типовых технологических процессов.

В стандартах любых видов, если это вызвано спецификой продукции, должны быть отражены требования безопасности труда.

В стандартах допускается предусматривать данные, свойственные стандартам нескольких видов, например стандартом правил приемки и методов контроля, стандарту технических требований, маркировки, упаковки, транспортирования и хранения.

Унификация электротехнических изделий

Электротехнические изделия, как известно, применяются во всех отраслях народного хозяйства, они должны удовлетворять особенностям каждой из этих отраслей техники — отсюда и колоссальная номенклатура различных видов этих изделий.

При многообразной номенклатуре изделий электротехнической промышленности и большом количестве исполнений особое значение имеют проводимые в отрасли работы по унификации, являющейся наиболее эффективным средством осуществления стандартизации, сокращения номенклатуры выпускаемых изделий, необходимой предпосылкой для организации специализированных производств.

Под унификацией понимают рациональное сокращение числа типов, видов и размеров изделий одинакового функционального назначения, а также узлов и деталей, входящих в них, создание комплексов ограниченного числа взаимозаменяемых узлов и деталей, с тем чтобы из них на основе базовой модели или самостоятельно, путем различных сочетаний, можно было собрать требуемые машины, механизмы, аппараты, приборы и различные устройства с добавлением некоторого ограниченного количества специальных (оригинальных) узлов и деталей.

Одним из основных этапов работ по унификации является выбор объектов унификации и разработка заданий по установлению уровня унификации основного и вспомогательного производства в пределах предприятия, объединения, подотрасли или отрасли в целом.

Унификация машин, аппаратов, приборов, устройств и т. д. одинакового функционального назначения основана на применении одной базовой модели для построения ряда однотипных изделий с различными основными параметрами.

Выбор объектов унификации электротехнических изделий базируется на анализе основных параметров, которым они должны соответствовать, выявлении общих из них и на разработке единых серий электротехнического оборудования (электрических машин, трансформаторов, электрических аппаратов) с характеристиками, удовлетворяющими требованиям как можно большего числа отраслей народного хозяйства. На базе основного исполнения единых серий разрабатываются специализированные исполнения, например, для химической промышленности, для работы в тропических условиях и т. д. При этом одновременно проводится максимальная унификация узлов сборочных единиц и деталей, применяемых в единых сериях.

Работы по унификации позволяют сократить срок и затраты на новые разработки, сократить цикл производства, повысить технологический уровень производства, сократить номенклатуру технологической оснастки и мерительного инструмента.

Унификация параметров, размеров, конструкций, широко применяемая при проектировании принятых в отрасли серий наиболее массовых видов изделий, позволяет из ограниченного числа унифицированных взаимозаменяемых сборочных единиц и деталей создавать большое количество исполнений. Примером применения такого вида унификации могут служить серии А2 и АО2 асинхронных двигателей мощностью от 0,6 до 100 кВт по ГОСТ 13859-68 и заменяющая их серия 4А по ГОСТ 19523-81. Так, в серии А2 и АО2 предусмотрено 72 тысячи типоисполнений двигателей, изготовляемых в девяти габаритах, с использованием 64 станин, 40 подшипниковых щитов, 42 исполнений валов, 26 — роторов, 79 — пакетов ротора и столько же пакетов статора, 29 — листов статора и 60 — листов ротора.

Примером размерной унификации может служить унификация и на ее основе стандартизация основных установочно-присоединительных размеров электрических машин; форм исполнений и их условных обозначений, высот осей вращения, концов электрических валов и присоединяемых к ним неэлектрических машин, конструкций и размеров мест крепления, допусков на установочно-присоединительные размеры (ГОСТ 12126-71, ГОСТ 18709-73 и др.).

В результате этой работы резко снижено количество типоразмеров элементов конструкций электрических машин и соответственно применяемой при их изготовлении технологической оснастки, повышены их взаимозаменяемость, качество и надежность изделий, а также конкурентоспособность на внешнем рынке.

Применение метода унификации позволяет:

значительно уменьшить объем конструкторских работ и сроки проектирования;

снизить стоимость и сократить сроки освоения производства новых изделий;

повысить уровень механизации и автоматизации производственных процессов, снизить трудоемкость и повысить производительность труда путем организации специализированных производств;

обеспечить бо́льшую гибкость и мобильность производства при переходе на выпуск новых изделий;

повысить качество выпускаемой продукции, надежность и долговечность путем тщательной отработки унифицированных конструкций изделий и технологии их изготовления;

облегчить эксплуатацию, обслуживание и ремонт.

Оценку уровня унификации изделий производят по количеству, массе и трудоемкости унифицированных деталей, отнесенных к общим количеству деталей, массе и трудоемкости изделия в целом.

1. Коэффициент унификации по количеству деталей

$$K_{\text{у,д}} = \Sigma УД/\Sigma Д,$$

где $\Sigma УД$ — количество унифицированных деталей в изделии; $\Sigma Д$ — общее количество деталей в изделии.

2. Коэффициент унификации по массе деталей

$$K_{\text{у,м}} = \Sigma УМ/\Sigma М,$$

где $\Sigma УМ$ — масса унифицированных деталей; $\Sigma М$ — общая масса изделия.

3. Коэффициент унификации по трудоемкости

$$K_{\text{у,т}} = \Sigma УТ/\Sigma Т,$$

где $\Sigma УТ$ — трудоемкость изготовления унифицированных деталей; $\Sigma Т$—общая трудоемкость изготовления изделия.

Под термином «унифицированные детали» в данном случае подразумевается сумма стандартизированных, заимствованных и покупных деталей.

Существенный недостаток каждой из приведенных формул — односторонняя характеристика степени унификации изделия. Более полную характеристику степени унификации изделия можно получить с помощью комплексного показателя, отражающего характерные стороны унификации изделия. Такой комплексный коэффициент степени унификации можно представить в следующем виде:

$$K = \frac{\Sigma УМ \cdot C_{\text{у,м}} + \Sigma УТ \cdot h}{\Sigma М \cdot C_{\text{м}} + \Sigma Т \cdot h},$$

где $C_{\text{у,м}}$ — средняя стоимость единицы массы унифицированных деталей в изделии; $C_{\text{м}}$ — средняя стоимость единицы общей массы изделия; h—средняя стоимость одного нормо-часа.

Таким образом, K — отношение части производственных затрат на изготовление унифицированных деталей к производственным затратам на изготовление всего изделия.

По состоянию на 1978 г. в электротехнической промышленности действовало более 100 государственных стандартов на параметрические ряды и, кроме того, значительное число

отраслевых стандартов, решающих задачи унификации.

В процессе стандартизации электротехнических изделий одновременно решаются вопросы унификации параметров, маркоразмеров и др. Так, введение ГОСТ 5008-60 «Кабели дальней связи низкочастотные» позволило снизить количество маркоразмеров с 1381 до 292, а при пересмотре его в 1973 г. была проведена дальнейшая унификация маркоразмеров.

В электротехнической промышленности определены группы и виды изделий, которые в наибольшей степени обеспечивают эффективность унификации изделий.

Большое значение имеет унификация материалов, комплектующих изделий. Известно, что многообразие материалов осложняет организацию производства, снижает серийность, увеличивает себестоимость. Поэтому одновременно со стандартизацией и унификацией готовых изделий проводится также и сокращение типоразмеров применяемых материалов и конструктивных элементов.

9.2. ГЛАВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И ПРИСОЕДИНЯЕМОГО К НИМ ОБОРУДОВАНИЯ

Общие положения

Главными парамстрами, служащими принципиальной основой проектирования и конструирования электротехнических изделий всех видов и назначений электрических устройств, электроустановок, а также применяемыми при практическом осуществлении электрификации в СССР, являются номинальные напряжения, частоты и токи, устанавливаемые государственными стандартами. Стандарты, нормирующие главные параметры, имеют важное значение для всего народного хозяйства.

Стандартные напряжения, частоты и токи определены комплексом стандартов:

ГОСТ 23366-78 «Ряды номинальных напряжений постоянного и переменного тока»;

ГОСТ 21128-78 «Системы электроснабжения. Сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В и допускаемые отклонения»;

ГОСТ 721-77 (СТ СЭВ 779-77) «Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В»;

ГОСТ 6697-75 «Системы электроснабжения, источники, преобразователи и приемники электрической энергии переменного тока. Номинальные частоты от 50 до 10 000 Гц и допускаемые отклонения»;

ГОСТ 6827-76 (СТ СЭВ 780-77) «Электрооборудование и приемники электрической энергии. Ряд номинальных токов».

Ряды номинальных постоянного и переменного напряжений

ГОСТ 23366-78 распространяется на изделия, имеющие выводы для электрического соединения (присоединения) с другими изделиями, и устанавливает ряды номинальных напряжений на выводах этих изделий для постоянного и переменного тока с частотами по ГОСТ 6697-75. ГОСТ 23366-78 применяется при разработке стандартов и технических условий, в которых нормируются ряды или отдельные значения номинальных напряжений на изделия конкретных групп и видов. Этот ГОСТ базируется на рядах предпочтительных чисел R40 и R80 по ГОСТ 8032-56 с учетом допустимых округленных значений.

Основной ряд постоянного и переменного напряжения для изделий, предназначенных для использования электронергии: 0,6; 1,2; 2,4; 6; 9; 12; 27; 40; 60; 110; 220; 380; 660; 1140; 3000; 6000; 10 000; 20 000; 35 000; 110 000; 220 000; 330 000; 500 000; 750 000; 1 150 000 В.

Для источников и преобразователей электроэнергии:

Переменные напряжения, В	6; 12; 28,5; 42; 62; 115; 120; 208; 230; 400; 690; 1200; 3150; 6300; 10 500; 13 800; 15 750; 18 000; 20 000; 24 000; 27 000; 38 500; 121 000; 242 000; 347 000; 525 000; 787 000
Постоянные напряжения, В	6; 9; 12; 28,5; 48; 62; 115; 230; 460; 690; 1200; 3300; 6600

Номинальные напряжения до 1000 В. ГОСТ 21128-75 устанавливает номинальные значения и допускаемые отклонения переменных и постоянных напряжений систем электроснабжения, сетей, источников, преобразователей и присоединяемых к ним приемников электроэнергии. Стандарт не устанавливает значения и допускаемые отклонения напряжений: соответствующих аварийным режимам работы и переходным процессам; на изделия, работа которых по принципу действия не характеризуется фиксированным значением напряжения; устройств для технологических процессов, осуществление которых не может быть обеспечено требованиями, указанными в стандарте; электрических цепей, замкнутых внутри электрических машин, аппаратов; устройств измерения, контроля, сигнализации и управления, электрифицированного транспорта. Но и в перечисленных случаях, когда это возможно, должны использоваться стандартные напряжения.

В диапазоне до 1000 В для четырехпроводной сети переменного тока два числовых значения номинальных напряжений записываются с дробной чертой, например 380/220 В, что означает соответственно междуфазное (в числителе) и фазное (в знаменателе) напряжения.

В табл. 9.1 приведены номинальные напряжения систем электроснабжения, источников, преобразователей, сетей и присоединяемых к ним приемников электрической энергии, установленные в ГОСТ 21128-75 в вольтах.

Стандартом дополнительно к приведенным в таблице допускается применение отдельных значений номинальных напряжений с указанием области или условий их применения, согласованных в надлежащем порядке.

Номинальные напряжения свыше 1000 В. Для электроснабжения потребителей электрической энергией в современных условиях используются почти исключительно системы трехфазного тока.

Таблица 9.1

Постоянный ток		Переменный ток[1]			
		Источники и преобразователи[2]		Сети и приемники	
Источники и преобразователи	Сеть и приемники	Однофазный ток	Трехфазный ток	Однофазный ток	Трехфазный ток
28,5 / 115	27 / 110	42	42	40	40
230	220	230	230	220	220
460	440		400	380	380
			690	660	660

[1] Номинальные переменные напряжения установлены для частот по ГОСТ 6697-75 и являются также рекомендуемыми для нефиксированных частот и частот более 10 000 Гц.

[2] Для источников и преобразователей трехфазного тока указаны междуфазные значения напряжений.

Таблица 9.2. **Классы напряжения электрооборудования; действующее значение напряжения, кВ**

Класс напряжения электрооборудования	Наибольшее рабочее напряжение электрооборудования	Номинальное напряжение электрической сети	Наибольшее длительное допускаемое рабочее напряжение в электрической сети
(3)	3,6	3,0	3,5
		3,15	3,5
		3,3	3,6
6	7,2	6,0	6,9
		6,6	7,2
10	12,0	10,0	11,5
		11,0	12,0
15	17,5	13,8	15,2
		15,0	17,5
		15,75	17,5
20	24,0	18,0	19,8
		20,0	23,0
		22,0	24,0
24	26,5	24,0	26,5
27	30,0	27,0	30,0
35	40,5	35,0	40,5
110	126,0	110,0	126,0
(150)	172,0	150,0	172,0
220	252,0	220,0	252,0
330	363,0	330,0	363,0
500	525,0	500,0	525,0
750	787,0	—	—
1150	1200,0	—	—

Примечания: 1. Классы напряжений 3 и 150 кВ допускаются только для существующих сетей.

2. Классы напряжений 15, 24 и 27 кВ допускаются для турбогенераторов мощностью 100 МВт и выше, гидрогенераторов 50 МВт и выше, синхронных компенсаторов 160 Мвар и выше.

ГОСТ 721-77 устанавливает номинальные междуфазные напряжения трехфазного тока свыше 1000 В электрических сетей, источников и приемников электрической энергии общего назначения, а также их наибольшие междуфазные рабочие напряжения, длительно допустимые по условиям работы изоляции электрооборудования для каждого класса напряжения.

В табл. 9.2 приведены только номинальные междуфазные напряжения сетей и приемников по ГОСТ 1516.1-76, соответствующие ГОСТ 721-77.

В ГОСТ 721-77 впервые предусмотрена новая ступень номинального напряжения для сетей и приемников электроэнергии 1150 кВ и соответственно 1200 кВ для наибольшего рабочего напряжения электрооборудования.

Классы напряжения, указанные в скобках, для вновь проектируемых сетей не рекомендуются. На эти напряжения электрооборудование изготовляется только для существующих и расширяющихся сетей.

Для электрооборудования, применяемого в угольной промышленности, кроме напряжений трехфазного переменного тока, указанных в таблице, применяются напряжения 1140 В для приемников и 1200 В для источников.

Номинальные частоты

Электроэнергия в СССР производится главным образом в виде переменного тока стандартной частоты 50 Гц. Часть производимой энергии этой частоты преобразуется для технологического использования и других целей в переменный ток повышенной (более 50 Гц) и частично пониженной (менее 50 Гц) частот. Мощность установок, работающих на частотах, отличающихся от 50 Гц, в пределах до 10 000 Гц достигает сотен мегаватт.

Широкое применение тока повышенной частоты для промышленных целей при отсутствии нормализованного ряда частот приводило к тому, что изготовлялись установки на произвольные, случайно выбранные заказчиками частоты без достаточного учета всех технико-экономических факторов, определяющих рациональность выбранной частоты. Это приводило к тому, что в стране стали изготовляться для промышленных целей установки на весьма близкие друг к другу частоты, например 400, 427, 450, 500 Гц. Рост числа частот переменного тока в свою очередь увеличил номенклатуру генераторов, приемников электроэнергии, регулирующей, измерительной аппаратуры и прочего электрооборудования. Это затрудняло изготовление и эксплуатацию установок промышленной частоты, особенно машинных генераторов, электродвигателей и преобразователей.

Из изложенного следует, что возник вопрос о стандартизации номинальных частот переменного тока, на которые должны изготовляться установки переменного тока как генерирующие, так и приемные и в первую очередь частот в диапазоне до 10 000 Гц, в котором главным образом изготовляются машинные генераторы и электродвигатели.

Номинальные значения частот, установленные ГОСТ 6697-75:

для источников энергии: 50, 400, 1000, 6000, 10 000 Гц;

для преобразователей и приемников электрической энергии: 50, 400, 1000, 2000, 4000, 6000, 10 000 Гц.

Дополнительно согласно стандарту допускается применение следующих частот:

для электроинструмента, электроприводов центрифуг, сепараторов и деревообрабатывающих станков: 100, 150, 200, 300 Гц;

для электротермического оборудования: 500, 2400, 8000 Гц;

для корабельных навигационных гироскопических устройств: 500 Гц.

Все указанные номинальные частоты кратны основной частоте тока, принятой в СССР и во всей Европе. Каждая из отдельно взятых частот ряда соответствует значениям предпочтительных чисел (точно или с учетом допускаемых округлений), установленных в ГОСТ 8032-56.

Преимущественное фактическое применение частот, предусмотренных ГОСТ 6697-75:

50 Гц — стандартная промышленная частота;

100, 150 Гц—электропривод деревообрабатывающих станков;

200 Гц — переносный электроинструмент, нужды полиграфической промышленности и ряд технологических процессов электронагрева;

300 Гц—электропривод в машиностроении;

400 и частично 500 Гц — для гироскопических приборов;

1000, 2000 и частично 2400 Гц — электропривод в машиностроении и в технологических процессах нагрева и плавки металлов;

остальные частоты ряда — преимущественно плавка металлов и сплавов.

В ГОСТ 6697-75 установлены допускаемые отклонения от номинальных значений частот систем электроснабжения, источников, преобразователей и приемников электроэнергии: 0,0002; 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5; 10 %[1].

Допускаемые отклонения от номинальных значений частот могут быть: двусторонние симметричные (±); односторонние (+) или (—); несимметричные.

[1] В технически обоснованных случаях по согласованию с головной организацией по стандартизации и основным заказчиком.

Указанные допускаемые отклонения не распространяются на электрические станции и сети общего назначения частотой 50 Гц, где качество энергии нормируется ГОСТ 13109-67.

Ряд номинальных токов

ГОСТ 6827-76 (СТ СЭВ 780-77) «Приборы и оборудование электрические. Номинальные токи» распространяется на электрические приборы, оборудование и приемники электрической энергии, для которых основным параметром является номинальный ток, а также на части электротехнических устройств, которые по своей конструкции и назначению рассчитаны на другие номинальные токи, отличающиеся от номинальных токов электротехнических устройств, например контакты реле, вспомогательные контакты.

Стандарт устанавливает номинальные значения постоянного и переменного токов от 0,0001 до 250 000 А с частотой до 10 000 Гц в нормальных и установившихся режимах работы электрических приборов, оборудования и приемников электрической энергии. Стандарт не устанавливает номинальные токи для:

переходных процессов;

электрооборудования технологических процессов, осуществление которых не может быть обеспечено требованиями настоящего стандарта;

цепей, замкнутых внутри электрических машин, аппаратов и подобных им изделий;

цепей и устройств измерения, контроля, сигнализации и управления;

элементов тепловых реле;

катушек электрических аппаратов;

аппаратов и трансформаторов тока, предназначенных для измерения токов источников электрической энергии и преобразовательных агрегатов на номинальные токи свыше 10 000 А;

бортового электрооборудования постоянного и переменного тока летательных аппаратов и специальных транспортных машин.

В перечисленных случаях номинальные токи следует по возможности выбирать из приведенных в указанном стандарте.

Номинальные токи, А, должны соответствовать табл. 9.3.

Таблица 9.3

0,0001	0,0010	0,010	0,108	1,00	10,0	100	1000	10 000 (11 200)	100 000 (112 000)
	0,0012	0,012	0,125	1,25	12,5	125	1250 (1400)	12 500 (14 000)	125 000 (140 000)
	0,0016	0,016	0,16	1,60	16,0	160	1600	16 000 (18 000)	160 000 (180 000)
0,0002	0,020	0,020	0,20	2,00	20,0	200	2000 (2250)	20 000 (22 500)	200 000 (225 000)
	0,0025	0,025	0,25	2,50	25,0	250	2500	25 000 (28 000)	250 000
0,0003	0,0030	0,030	0,315	3,15	31,5	315	3150	31 500 (35 500)	
0,0004	0,0040	0,040	0,40	4,00	40,0	400	4000	40 000 (45 000)	
0,0005	0,0050	0,050	0,50	5,00	50,0	500	5000	50 000 (56 000)	
0,0006	0,0060	0,060	0,63	6,30	63,0	630	6300	63 000 (71 000)	
0,0008	0,0080	0,080	0,80	8,00	80,0	800	8000	80 000	

Примечания: 1. Значения токов, указанные в скобках, в новых разработках применять не следует.

2. Для плавких вставок предохранителей низкого напряжения допускается применять значения тока 35 А, которое заменяет 31,5 и 40 А.

3. Для трансформаторов тока допускается применять в дополнение к указанным следующие значения токов: 15, 30, 60, 75 и 120 А.

Из приведенных значений токов до 1000 А предпочтительными являются следующие: 1,00; 1,60; 2,50; 4,00; 6,30 А, а также десятичные кратные и дольные значения этих токов.

Номинальные токи 0,125; 0,315; 0,63; 3,15; 6,30; 12,5; 31,5 А можно округлять до следующих значений: 0,12; 0,30 или 0,32; 3,0 или 3,2; 6,00; 12,0; 32,0 А. Токи менее 0,1 А округляются аналогично.

9.3. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Степени защиты электротехнических изделий, обеспечиваемые оболочками

К стандартам, общим для всех электротехнических изделий, относится также ГОСТ 14254-80 (СТ СЭВ 778-77) «Изделия электротехнические. Оболочки. Степени защиты. Обозначения. Методы испытаний». Этот стандарт распространяется на электротехнические изделия с номинальными напряжениями не более 72,5 кВ.

Для обозначения степени защиты применяются буквы IP и следующие за ними две цифры. Первая цифра обозначает степень защиты от соприкосновения с движущимися частями, расположенными внутри оболочки, а также степень защиты оболочки от попадания внутрь твердых посторонних тел. Вторая цифра обозначает степень защиты изделий от попадания воды.

Степени защиты, определенные первой цифрой обозначения, указывают:

0 — защита отсутствует;

1 — защита от проникновения внутрь оболочки твердых тел размером более 50 мм, а также от проникновения большого участка поверхности человеческого тела;

2 — защита от проникновения твердых тел размером более 12 мм, а также пальцев или предметов длиной более 80 мм;

3 — защита от твердых тел — инструментов, проволоки диаметром или толщиной более 2,5 мм;

4 — защита от проволоки, твердых тел размером 1,0 мм;

5 — защита от пыли. При этом проникновение внутрь оболочки пыли полностью не предотвращается, однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделия;

6 — пыленепроницаемость. Проникновение пыли предотвращено полностью.

Степени защиты, определенные второй цифрой обозначения, указывают:

0 — защита отсутствует;

1 — защита от капель воды, падающих вертикально на оболочку, они не должны оказывать вредного воздействия на изделие;

2 — защита от капель воды при наклоне до 15°. Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие при наклоне его оболочки на любой угол до 15° относительно нормального положения;

3 — защита от дождя. Вода в виде дождя, падающая на оболочку под углом до 60° от вертикали, не должна оказывать вредного воздействия на изделие;

4 — защита от брызг. Вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на изделие;

5 — защита от водяных струй. Струя воды, выбрасываемая в любом направлении на оболочку, не должна оказывать вредного воздействия на изделие;

6 — защита от волн воды. Вода при волнении не должна попадать внутрь оболочки в количестве, достаточном для повреждения изделия;

7 — защита при погружении в воду. Вода не должна проникать в оболочку, погруженную в воду при определенных условиях давления и времени, в количестве, достаточном для повреждения изделия;

8 — защита при длительном погружении в воду. Изделия пригодны для длительного погружения в воду при условиях, установленных изготовителем.

Обозначения степени защиты наносятся на оболочку изделия или на табличку с паспортными данными.

Например, IP23 — оболочка электротехнического изделия, предохраняющая персонал от возможности соприкосновения пальцами с токоведущими или движущимися частями изделия и, кроме того, предохраняющая от попадания твердых тел диаметром более 12 мм и от дождя, падающего на оболочку под углом до 60° к вертикали.

Если для изделия не требуется ни один из видов защиты, допускается в условном обозначении проставлять знак X вместо обозначения того вида защиты, который не требуется или испытание которого не производится, например IPX2.

Под защитой от соприкосновения с движущимися частями подразумевается только защита от соприкосновения с такими движущимися частями внутри оболочки, которые могут причинить вред персоналу.

В ГОСТ 14254-80 установлены методы испытания для проверки степеней защиты электротехнического изделия, находящегося в оболочке.

В дополнение к ГОСТ 14254-80 имеются стандарты на изделия отдельных подотраслей электротехнической промышленности.

Степени защиты электрических машин

Конкретные серии или типы электрических машин в зависимости от номинального режима и условий работы, для которых они предназначены, изготовляются со степенями защиты по ГОСТ 17494-72 (СТ СЭВ 247-74). Стандарт устанавливает степени защиты электрических машин номинальным напряжением до 1000 В. Степени защиты приведены в табл. 9.4.

Исходя из специфических особенностей отдельных видов электрических машин, допускаются степени защиты IP57 и IP58.

Таблица 9.4

Степень защиты персонала от соприкосновения и попадания посторонних тел	Вторая цифра (защита от проникновения воды)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	IP00	IP01	—	—	—	—	—	—	—
1	IP10	IP11	IP12	IP13	—	—	—	—	—
2	IP20	IP21	IP22	IP23	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	IP43	IP44	—	—	—	—
5	—	—	—	—	IP54	IP55	IP56	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 9.5

Первая цифра (защита от прикосновения и посторонних тел)	Вторая цифра (защита от проникновения воды)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	IP00	—	—	—	—	—	—	—	—
1	IP10	IP11	IP12	—	—	—	—	—	—
2	IP20	IP21	IP22	IP23	—	—	—	—	—
3	IP30	IP31	IP32	IP33	IP34	—	—	—	—
4	IP40	IP41	IP42	IP43	IP44	—	—	—	—
5	IP50	—	—	—	IP55	IP56	—	—	—
6	IP60	—	—	—	—	IP65	IP66	IP67	IP68

Степени защиты электрических аппаратов

Конкретные серии или типы аппаратов в зависимости от номинального режима и условий работы, для которых они предназначены, изготовляются со степенями защиты по ГОСТ 14255-69 (СТ СЭВ 592-77).

Стандарт устанавливает степени защиты электрических аппаратов номинальным напряжением до 1000 В (табл. 9.5).

В примечании к стандарту указано, что по соглашению между изготовителем и заказчиком допускается применять другие степени защиты.

Общие положения о воздействии механических и климатических факторов внешней среды на электротехнические изделия в условиях эксплуатации

Нормы и требования к изделиям в части воздействия на них климатических и механических факторов внешней среды устанавливались до 1969 г. разрозненно — в технических заданиях (ТЗ) на проектирование или модернизацию изделий, а также в стандартах и технических условиях на отдельные изделия. В результате изделия, работающие практически в одних и тех же условиях внешней среды, не были унифицированы по показателям, характеризующим условия эксплуатации. Некоторая унификация достигалась только в пределах отдельных подотраслей электротехники тем, что начиная еще с 1941 г., в стандартах, устанавливающих общие технические требования к отдельным группам изделий, например, к электрическим машинам (ГОСТ 183-41), силовым трансформаторам, — или отдельным группам электрических аппаратов на напряжения до 1000 В, нормировались условия окружающей среды (в ограниченном объеме), для которых предназначались указанные электротехнические изделия.

В 1969—1972 гг. был утвержден ряд основополагающих стандартов, устанавливающих исполнения и категории изделий в части климатических и механических факторов внешней среды, воздействующих на изделия, в зависимости от их размещения в различных климатических районах.

В отношении климатических воздействий обобщения начались с того, что был утвержден основополагающий стандарт ГОСТ 15150-69 (СТ СЭВ 458-77, СТ СЭВ 460-77) «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды», а также базирующиеся на нем стандарты, определяющие требования к специальным климатическим исполнениям.

ГОСТ 15151-69 «Машины, приборы и другие технические изделия для районов с тропическим климатом. Общие технические условия».

ГОСТ 14892-69 «Машины, приборы и другие технические изделия, предназначенные для эксплуатации в районах с холодным климатом. Общие технические требования».

Для развития и конкретизации требований этих стандартов с учетом специфики электротехнических изделий были разработаны следующие стандарты:

ГОСТ 15543-70 «Изделия электротехнические. Исполнения для различных климатических районов. Условия эксплуатации в части воздействия климатических факторов внешней среды»;

ГОСТ 15963-79 «Изделия электротехнические для районов с тропическим климатом. Общие технические условия»;

ГОСТ 17412-72 «Изделия электротехнические для районов с холодным климатом. Общие технические условия».

В отношении механических воздействий обобщение производилось одновременно для двух отраслей — электротехники и электронной техники. Был утвержден стандарт ГОСТ 16962-71 «Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний».

Так как этот стандарт содержал только ряд значений отдельных факторов, а требовалась также привязка этих значений к условиям эксплуатации, был утвержден еще один стандарт — ГОСТ 17516-72 «Изделия электротехнические. Условия эксплуатации в части воздействия механических факторов внешней среды».

Указанные стандарты полностью определяют требования к электротехническим изделиям в части воздействия внешних климатических и механических факторов, относящихся ко всем электротехническим изделиям.

Приведенные стандарты применяются при проектировании и изготовлении изделий, при составлении технических заданий (ТЗ) на разработку или модернизацию изделий, а также при разработке стандартов и технических условий, устанавливающих требования и программы испытаний (ПИ) в части воздействия механических и климатических факторов внешней среды для групп изделий, а при отсутствии групповых документов — для отдельных видов и типов изделий.

В этих стандартах установлены группы исполнений изделий, к которым предъявляют требование выдерживать то или иное сочетание климатических факторов, в обобщенной форме отражающих условия эксплуатации.

В стандартах указано, что изделия должны сохранять свои параметры в пределах норм, установленных соответствующей нормативно-технической документацией в течение обусловленных сроков службы и сроков сохраняемости после и (или) в процессе воздействия механических и климатических факторов, виды и значения которых соответствуют нормативно-технической документации, разработанной на основе названных стандартов.

Технические требования по климатическим воздействиям

ГОСТ 15150-69 распространяется на все виды машин, приборов и других технических изделий. Этот стандарт соответствует СТ СЭВ 458-77 и СТ СЭВ 460-77, а также ГОСТ 16350-70 «Климат. Районирование и характеристики климатических параметров для промышленных изделий».

В ГОСТ 15150-69 установлены климатические факторы. Под термином «климатические факторы внешней среды» понимаются: температура, влажность воздуха, давление воздуха или газа (высота над уровнем моря), солнечное излучение, дождь, ветер, пыль (в том числе снежная), смены температур, соляной туман, иней, гидростатическое давление воды, действие плесневых грибков, содержание в воздухе коррозионно-активных агентов. Различают нормальные и номинальные значения климатических факторов.

Нормальные значения климатических факторов внешней среды — уточненные для использования в технике, естественно изменяющиеся значения климатических факторов в пределах данной географической зоны с учетом места размещения изделия.

Номинальные значения климатических факторов внешней среды — нормируемые в технических заданиях, стандартах или технических условиях значения климатических факторов (естественно изменяющиеся или неизменные), в пределах которых обеспечивается нормальная эксплуатация конкретных видов изделий, т. е. фактические требования к изделиям. В стандартах вида, технических требований, общих технических условий, в технических заданиях устанавливают требования по номинальным значениям климатических факторов.

В пределах нормальных и номинальных значений различают также рабочие и предельные рабочие значения.

Рабочие значения климатических факторов внешней среды — естественно изменяющиеся или неизменные значения климатических факторов, в пределах которых обеспечивается сохранение требуемых номинальных параметров и экономически целесообразных сроков службы изделий.

Предельные рабочие значения климатических факторов внешней среды при эксплуатации — значения климатических факторов, в пределах которых изделия могут (чрезвычайно редко и в течение не более 6 ч в году) оказаться при эксплуатации и должны при этом:

а) сохранять работоспособность, но могут не сохранять требуемой точности и номинальных параметров (при этом в стандарте или технических условиях на изделия указываются допустимые отклонения по точности и номинальным параметрам, если эти отклонения имеют место);

б) после прекращения действия этих предельных рабочих значений восстанавливать требуемую точность и номинальные параметры. Требования к предельным рабочим значениям целесообразно предъявлять только к изделиям с высокой вероятностью безотказной работы.

В соответствии с ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 16350-70 поверхность земного шара разделена на ряд макроклиматических[1] районов, разграниченных с точки зрения воздействия климатических факторов на технические изделия.

Технические изделия предназначают для эксплуатации в одном или нескольких микроклиматических районах и изготовляют в климатических исполнениях, указанных в табл. 9.6. Эти изделия в зависимости от места размещения при эксплуатации в воздушной среде на высотах до 4300 м (в том числе под землей и под водой) изготавливают по категориям размещения изделий (в дальнейшем категориям изделий, указанным в табл. 9.7).

Для изделий, предназначенных для эксплуатации только в невоздушной среде и (или) при атмосферном давлении менее 53,3 кПа (400 мм рт. ст.), в том числе на высотах более 4300 м, понятие категорий изделий не применяют для всех стадий эксплуатации. Если одно и то же изделие предназначено для эксплуатации как в воздушной среде на высотах до 4300 м, так и в невоздушной среде

[1] Макроклимат — климат крупных географических зон или больших их частей, рассматриваемых в основных своих чертах, например по однородности географических факторов, по значению определенных факторов, характеризующихся количественными показателями по всей рассматриваемой территории. Макроклимату противопоставляется местный климат (в том числе климат менее крупных районов и зон) и микроклимат.

Таблица 9.6

Исполнения изделий	Обозначения[1]		
	буквенные		Цифровые
	русские	латинские	
Изделия, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах			
Для макроклиматического района с умеренным климатом[2]	У	(N)	0
Для макроклиматических районов с умеренным и холодным климатом[2]	УХЛ[4]	(NF)	1
Для макроклиматического района с влажным тропическим климатом[3]	ТВ	(TH)	2
Для макроклиматического района с сухим тропическим климатом[3]	ТС	(TA)	3
Для макроклиматических районов как с сухим, так и с влажным тропическим климатом[3]	Т	(T)	4
Для всех макроклиматических районов на суше, кроме макроклиматического района с очень холодным климатом (общеклиматическое исполнение)	О	(U)	5
Изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом			
Для макроклиматического района с умеренно холодным морским климатом	М	(M)	6
Для макроклиматического района с тропическим морским климатом, в том числе для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в этом районе	ТМ	(MT)	7
Для макроклиматического района как с умеренно холодным, так и тропическим морским климатом, в том числе для судов неограниченного района плавания	ОМ	(MU)	8
Изделия, предназначенные для эксплуатации во всех макроклиматических районах на суше, и на море, кроме климатического района с очень холодным климатом (всеклиматическое исполнение)	В	(W)	9

[1] В скобках приведены обозначения, принятые в некоторых странах СЭВ. Цифровые обозначения применяют только для обработки данных на электрических вычислительных машинах и не применяют для маркировки.

[2] Изделия в исполнениях У и УХЛ могут эксплуатироваться в теплой и влажной зонах СССР, в которых средняя из ежегодных абсолютных максимумов температура воздуха выше 40 °С и (или) сочетание температуры, равной или выше 20 °С, и относительной влажности, равной или выше 80 %, наблюдается более 12 ч в сутки за непрерывный период более двух месяцев в году.

[3] Указанные исполнения могут быть обозначены термином «тропическое исполнение».

[4] Если основным назначением изделий является эксплуатация в районах с холодным климатом и экономически нецелесообразно их использование вне пределов этого района, вместо обозначения УХЛ рекомендуется ХЛ.

и (или) при атмосферном давлении менее 53,3 кПа (400 мм рт. ст.), в том числе на высотах более 4300 м, понятие категорий изделий применяют только для стадии эксплуатации в воздушной среде на высотах до 4300 м.

Летательные аппараты, а также изделия, предназначенные для эксплуатации на высоте более 1000 м над уровнем моря при пониженном атмосферном давлении, изготавливают по группам в зависимости от пониженного атмосферного давления, указанного в табл. 9.8. Сочетание исполнения, категории и группы по пониженному давлению называют «вид климатического исполнения» (например, «вид климатического исполнения УХЛ2а)».

В условном обозначении типа изделия дополнительно, после всех обозначений, относящихся к модификации изделий, вводят буквы и цифры, обозначающие вид климатического исполнения, например электродвигатель закрытого обдуваемого исполнения со станиной и щитами из чугуна (АО2) второго габарита, 1-й длины (21), четырехполюсного, т. е. 1500 об/мин (4), в тропическом исполнении (Т), категории размещения (2) для работы на высоте до 2400 м (группа «а») обозначают АО2-21-4Т2а.

Обозначения климатического исполнения и категории указывают в сопроводительном документе и на табличке.

Для изделий, пригодных для эксплуатации одновременно в условиях, нормированных для нескольких климатических исполнений или категорий размещения, допускается устанавливать обозначения одного из исполнений, обеспечивающего наиболее жесткие требования, или комбинированные обозначения.

Большинство электротехнических изделий, не предназначенных для летательных аппаратов, изготовляют для работы на нормальной высоте 1000 м над уровнем моря, до которой изделия предназначены работать с номинальными параметрами. Однако изделия могут работать на высотах, превышающих нормальную, но в этом случае в стандартах или в технических условиях на такие изделия указывают уменьшение номинальной нагрузки или предельно допустимых превышений температуры на каждые 100 или 1000 м высоты, превышающей нормальную.

В ГОСТ 15150-69 установлены коэффициенты, указывающие относительную электрическую прочность воздушных промежутков для высот от 1000 до 30 000 м (табл. 9.9).

В ГОСТ 15150-69 установлено четыре типа атмосфер на открытом воздухе, различающихся содержанием в них основных коррозионно-активных агентов, согласно табл. 9.10.

Электротехнические изделия климатических исполнений У, УХЛ, Т, ТС предназначаются для эксплуатации в атмосфере типов I и II; электротехнические изделия исполнений М, ОМ — в атмосфере типа III; исполнения О — в атмосфере типа IV; исполнения В — в атмосфере типов III и IV. В этих случаях в нормативно-технической документации на изделия не делают никаких указаний об атмосфере. Если же изделия предназначаются для эксплуатации только в атмосфере типа I, то должны быть сделаны специальные указания в нормативно-технической документации (НТД).

Очень важное значение имеет установленная в ГОСТ 15150-69 классификация групп условий эксплуатации по коррозионной активности атмосферы для металлов, сплавов, а

Таблица 9.7

Укрупненные категории		Дополнительные категории	
Характеристика	Обозначение	Характеристика	Обозначение по десятичной системе
Для эксплуатации на открытом воздухе	1	Изделия для хранения в процессе эксплуатации в помещениях категории 4 и работы как в условиях категории 4, так и (кратковременно) в других условиях, в том числе на открытом воздухе	1,1
Для эксплуатации под навесом или в помещениях (объемах), где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебания на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха, например в палатках, кузовах, прицепах, металлических помещениях без теплоизоляции, а также в кожухе комплектного изделия категории 1 (отсутствие прямого воздействия солнечного излучения и атмосферных осадков на изделие)	2	Для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категорий 1; 1.1 и 2, конструкция которых исключает возможность конденсации влаги на встроенных элементах (например, внутри радиоэлектронной аппаратуры)	2,1
Для эксплуатации в закрытых помещениях (объемах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе, например в металлических с теплоизоляцией, каменных, бетонных, деревянных помещениях (отсутствие воздействия атмосферных осадков, прямого солнечного излучения, существенное уменьшение ветра, существенное уменьшение или отсутствие воздействия рассеянного солнечного излучения и конденсации влаги)	3	Для эксплуатации в нерегулярно отапливаемых помещениях (объемах)	3,1
Для эксплуатации в помещениях (объемах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями, например в закрытых отапливаемых или охлаждаемых и вентилируемых производственных и других, в том числе хорошо вентилируемых, подземных помещениях (отсутствие воздействия прямого солнечного излучения, атмосферных осадков, ветра, песка и пыли наружного воздуха; отсутствие воздействия рассеянного солнечного излучения и конденсации влаги)	4	Для эксплуатации в помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом Для эксплуатации в помещениях лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа	4,1
Для эксплуатации в помещениях (объемах) с повышенной влажностью (например, в неотапливаемых и невентилируемых подземных помещениях, в том числе шахтах, подвалах, в почве, в таких судовых, корабельных и других помещениях, в которых возможно длительное наличие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке, в частности, в некоторых трюмах, в некоторых цехах текстильных, гидрометаллургических производств и т. п.)	5	Для эксплуатации в качестве встроенных внутрь комплексных изделий категории 5 элементов, конструкция которых исключает возможность конденсации влаги на встроенных элементах	5,1

также металлических и неметаллических неорганических покрытий (табл. 9.11).

Таблица 9.8

Обозначение групп пониженного давления	Атмосферное давление, кПа		Высота над уровнем моря, тыс. км
	Нижнее значение (по ГОСТ 15150-69)	Среднее значение (по ГОСТ 4401-81)	
а	70,0	75,6	2,4
б	60,0	65,8	3,5
в	53,3	59,3	4,3
г	26,7	29,0	9,4
д	12,0	13,3	14,4
е	4,4	5,5	20,0
ж	2,0	2,2	26,0
з	0,6	0,6	34,0
и	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$	45,8
к	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$1{,}3\cdot10^{-2}$	63,6
л	$1{,}3\cdot10^{-4}$	$1{,}3\cdot10^{-4}$	91,7
м	$1{,}3\cdot10^{-7}$	$1{,}3\cdot10^{-7}$	200
н	$1{,}3\cdot10^{-10}$	$1{,}3\cdot10^{-10}$	Средний и дальний космос
о	$1{,}3\cdot10^{-13}$	$1{,}3\cdot10^{-13}$	
п	$1{,}3\cdot10^{-14}$	$1{,}3\cdot10^{-14}$	

Следует отметить, что в стандарте не учтены случаи воздействия на изделия смен температуры, а также случаи, когда в изделиях имеются материалы, выделяющие коррозионно-

Таблица 9.9

Высота над уровнем моря, км	Коэффициент относительной электрической прочности воздушных промежутков	Высота над уровнем моря, км	Коэффициент относительной электрической прочности воздушных промежутков
1	1,00	9,0	0,39
1,2	0,98	10,0	0,35
1,5	0,95	12,0	0,30
1,8	0,92	14,0	0,25
2,0	0,90	15,0	0,22
2,5	0,85	16,0	0,19
3,0	0,80	18,0	0,14
3,5	0,75	20,0	0,10
4,0	0,72	22,0	0,08
4,5	0,67	24,0	0,07
5,0	0,62	25,0	0,06
6,0	0,56	26,0	0,05
7,0	0,51	28,0	0,04
8,0	0,45	30,0	0,03

Таблица 9.10

Тип атмосферы		Содержание коррозионно-активных агентов
Обозначение	Наименование	
I	Условно-чистая	Сернистый газ не более 20 мг/(м²·сут), не более 0,025 мг/м³; хлориды — менее 0,3 мг/(м²·сут)
II	Промышленная	Сернистый газ от 20 до 110 мг/(м²·сут), от 0,025 до 0,13 мг/м³; хлориды — менее 0,3 мг/(м²·сут)
III	Морская	Сернистый газ не более 20 мг/(м²·сут), не более 0,025 мг/м³; хлориды — от 30 до 300 мг/(м²·сут)
IV	Приморско-промышленная	Сернистый газ от 20 до 110 мг/(м²·сут), от 0,025 до 0,13 мг/м³; хлориды — от 0,3 до 30 мг/(м²·сут)

Таблица 9.11

Группа условий эксплуатации			Исполнение	Категория изделий
Название	Обозначение основное	Обозначение дополнительное		
Легкая	Л	—	Все исполнения УХЛ, У, ТС	4.1 2.1; 3*; 4 (кроме 4.1)
Средняя	С	С1	ТВ, Т, М, ТМ, ОМ, О, В	4 (кроме 4.1)
			ТС	2; 3
			ТВ, Т, О, В	3*
			ТС	1* (кроме 1.1)
			Т, ТВ, О	2.1; 3.1
		С2	ТС	1
		С3	У, УХЛ	2; 3; 1**; 1* (кроме 1.1)
		С4	Все исполнения, кроме ТС	1.1
Жесткая	Ж	Ж1	ТВ, Т, О	2; 3; 1**; 1* (кроме 1.1)
		Ж2	У, ХЛ	1 (кроме 1.1)
		Ж3	М, ТМ, ОМ, В	2***, 1***
Особо жесткая	ОЖ	ОЖ1	Все исполнения	5
		ОЖ2	Все исполнения	3.1
		ОЖ3	ТВ, Т, О	1 (кроме 1.1);
			М, ТМ, ОМ	1 (кроме 1.1); 2

* Только для внутренних деталей, размещенных в оболочках с естественной или искусственной вентиляцией.

** Только для изделий, специально предназначенных для эксплуатации в среде с условно-чистой атмосферой.

*** Только для деталей, защищенных от попадания брызг морской воды.

активные вещества. Эти случаи при необходимости оговариваются в стандартах или другой нормативно-технической документации на изделия.

В стандарте также указано, как должен производиться выбор групп условий эксплуатации металлов и покрытий в зависимости от климатического исполнения и категорий размещения изделий.

В ГОСТ 15150-69 установлены также условия хранения и транспортирования изделий в части воздействия климатических факторов внешней среды (здесь не приводятся).

ГОСТ 15543-70 «Изделия электротехнические. Исполнения для различных климатических районов. Условия эксплуатации в части воздействия климатических факторов внешней среды» ограничивает и конкретизирует требования ГОСТ 15150-69 применительно к специфике электротехнических изделий. Так, этим стандартом ограничивается (по сравнению с ГОСТ 15150-69) количество климатических исполнений и категорий для электротехнических изделий. Эти изделия не изготовляют исполнений ТВ, ТМ, исполнение ТС резко ограничено. Как правило, изделия изготовляют только категорий 1, 2, 3, 4, 5, а некоторые изделия — категорий 2.1 и 5.1.

В зависимости от категорий, исполнений и конструктивных особенностей изделий установлены эффективное и верхнее рабочее значения температуры окружающего воздуха, для которых изделия предназначены (здесь не приводятся).

Под эффективным значением климатического фактора в соответствии с ГОСТ 15150-69 понимают условное постоянное значение фактора, принимаемое при расчетных номинальных параметрах изделий, влияющих на срок службы и (или) сохраняемости, существенно зависящих от данного фактора и нормированных для длительной работы изделий. Воздействие эффективного значения, как правило, эквивалентно воздействию переменного значения данного фактора в процессе эксплуатации и (или) хранения.

В ГОСТ 15543-70 приведены также типовые формулировки записи требований по воздействию климатических факторов в стандартах и другой нормативно-технической документации. Требования по климатическим воздействиям записывают в стандартах и технических условиях на изделия в виде ссылок на ГОСТ 15543-70 и ГОСТ 15150-69.

Технические требования по механическим воздействиям

ГОСТ 16962-71 «Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний» устанавливает следующие виды механических факторов, воздействующих на изделие в целом в эксплуатации: вибрационные нагрузки, ударные нагрузки (многократные и одиночные), линейные нагрузки, воздействия акустического шума. Установленные в стандарте характеристики отражают в обобщенной форме фактические воздействия на изделия в условиях эксплуатации. Установлены также некоторые специфические воздействия,

действующие на выводные концы изделий; растягивающей силы, изгибающей силы, крутящего момента, скручивания. Эти характеристики в обобщенной форме отражают условия, которые имеют место при монтаже изделий у потребителя.

К изделиям, предназначенным для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, предъявляют требования по прочности и устойчивости при воздействии этих нагрузок. К изделиям, не предназначенным для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, предъявляют требования только по прочности при воздействии этих нагрузок.

Под прочностью к воздействию механических факторов понимают способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах норм, установленных в стандартах (или технических условиях), после воздействия механических факторов.

Под стойкостью к воздействию механических факторов понимают способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах норм, установленных в стандартах (или в технических условиях), во время воздействия механических факторов.

Таблица 9.12

Воздействующие факторы	Значение характеристик			Степень жесткости
	Диапазон частот, Гц	Максимальное ускорение, м/с²	Длительность удара, мс	
Вибрационные нагрузки	1—35	5	—	I
	1—60	10	2	II
	1—60	20	—	III
	1—80	50	—	IV
	1—100	10	—	V
	1—200	50	—	VI
	1—200	100	—	VII
	1—600	50	—	VIII
	1—600	100	—	IX
	1—1000	100	—	X
	1—2000	50	—	XI
	1—2000	100	—	XII
	1—2000	150	—	XIII
	1—2000	200	—	XIV
	1—3000	200	—	XV
	1—5000	100	—	XVI
	1—5000	200	—	XVII
	1—5000	300	—	XVIII
	1—5000	400	—	XIX
	100—5000	400	—	XX
Ударные нагрузки:				
многократные	—	150	2—15	I
	—	400	2—10	II
	—	750	2—6	III
	—	1500	1—3	IV
одиночные	—	40	40—60	I
	—	200	20—50	II
	—	750	2—6	III
	—	1500	1—3	IV
	—	5000	1—2	V
	—	10 000	0,2—1	VI
	—	15 000	0,2—0,5	VII
	—	30 000	0,2—0,5	VIII
Линейные (центробежные нагрузки)	—	100	—	I
	—	250	—	II
	—	500	—	III
	—	1000	—	IV
	—	1500	—	V
	—	2000	—	VI
	—	5000	—	VII

Таблица 9.13

Значения характеристик		Степень жесткости
Диапазон частот, Гц	Максимальный уровень звукового давления, дБ	
50—10 000	130	I
	140	II
	150	III
	160	IV
	170	V

Примечание. Нулевой уровень звукового давления соответствует $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Виды механических факторов и значения их характеристик (степени жесткости) приведены в табл. 9.12. В указанных в табл. 9.12 диапазонах частот амплитуда вибрации не превышает 10 мм.

Степени жесткости XVI—XX по вибрационным нагрузкам устанавливают для изделий миниатюрных и сверхминиатюрных конструкций (например, для микроэлементов, интегральных микросхем, полупроводниковых приборов). Степень жесткости XX по вибрационным нагрузкам устанавливают в технически обоснованных случаях в качестве дополнительного требования к другим степеням жесткости.

Для изделий, предназначенных для работы в условиях воздействия акустического шума, значения характеристик акустического шума (степени жесткости) приведены в табл. 9.13.

Установленные в ГОСТ 16962-71 степени жесткости представляют собой порядковые номера в ряду значений каждого фактора и введены только для удобства ссылок в этом же стандарте при описании режимов испытаний. Эти степени жесткости не применяются для ссылок на них в стандартах на электротехнические изделия. В последних ссылки в части воздействия механических факторов внешней среды даются на группы условий эксплуатации по ГОСТ 17516-72, утвержденному в развитие и конкретизацию ГОСТ 16962-71 применительно к электротехническим изделиям. В ГОСТ 17516-72 установлено 30 групп условий эксплуатации (М1—М30) в зависимости от места размещения изделий при эксплуатации и вида объектов: в стационарных установках, на металлорежущих станках, прессах, молотах, вибромолотах, передвижных установках, тележках магистральных и промышленных электровозов и в сочетании с многими другими видами рабочих машин и механизмов.

Для каждой группы условий эксплуатации установлены вибрационные нагрузки (диапазон частот, максимальное ускорение и степени жесткости по ГОСТ 16962-71), многократные удары (ускорение, длительность удара и степени жесткости по ГОСТ 16962-71), а также одиночные удары.

Таким образом, все многообразие условий эксплуатации электротехнических изделий сведено к сравнительно небольшому количеству классификационных групп.

В соответствии с экономической и технической целесообразностью рекомендуется изготовлять изделия, пригодные для нескольких

групп условий эксплуатации, нормированных в ГОСТ 17516-72.

Изделия, удовлетворяющие требованиям какой-либо из групп, допускается применять в местах, указанных для других групп, если изделия удовлетворяют требованиям, нормированным для этих групп.

Электротехнические изделия для районов с тропическим и холодным климатом

Для районов с тропическим климатом электротехнические изделия изготовляются в соответствии с требованиями ГОСТ 15963-79 «Изделия электротехнические для районов с тропическим климатом. Общие технические условия».

ГОСТ 15963-79 распространяется на электротехнические изделия, предназначенные для эксплуатации в районах с сухим и влажным тропическим климатом (исполнение Т), а также для установки на морских судах или других устройствах, предназначенных для эксплуатации в районах как с тропическим, так и с умеренно холодным климатом (исполнение ОМ). В технически обоснованных случаях допускается изготовление исполнений ТС.

В соответствии с ГОСТ 15693-79 изделия Т и ТС рассчитывают для длительной работы при напряжении от $0{,}95U_{ном}$ до $1{,}05U_{ном}$, они должны сохранять свою работоспособность при кратковременном изменении напряжения сети в пределах от $0{,}85U_{ном}$ до $1{,}1U_{ном}$ при переменном токе и от $0{,}8U_{ном}$ до $1{,}1U_{ном}$ при постоянном токе.

Длительность указанного изменения напряжения оговаривают в стандартах на отдельные типы электротехнических изделий тропического исполнения.

В стандарте установлены предельные допускаемые превышения температуры для изделий тропического исполнения и их частей в зависимости от эффективной температуры окружающего воздуха и класса нагревостойкости электрической изоляции, которые намного ниже установленных для электротехнических изделий нетропических исполнений.

Электротехнические изделия, предназначенные для эксплуатации в районах с холодным климатом (исполнение УХЛ по ГОСТ 15150-69), изготовляют в соответствии с требованиями ГОСТ 17412-72 «Изделия электротехнические для районов с холодным климатом. Общие технические условия».

В обоих стандартах установлены требования по конструктивному выполнению изделий, связанному со специфическими воздействиями соответственно тропического и холодного климата.

К стандартам приложен перечень основных материалов, применяемых для изготовления оборудования в указанных климатических исполнениях (конструкционные металлы и сплавы, электротехнические магнитные и электроизоляционные материалы, покровные и клеящие лаки и эмали, пластмассы, кабели и провода и т. д.). Установлены также правила приемки и методы испытаний изделий в части специфических воздействий факторов климата.

При конструировании изделий для районов с тропическим или холодным климатом в первую очередь определяют возможность обеспечения их работоспособности модернизацией существующих конструкций или защитой от воздействия климатических факторов на месте установки. При невозможности обеспечить работоспособность изделий таким путем разрабатывают новую конструкцию с учетом требований, установленных в этих стандартах к конструкции таких изделий и их элементов (к подшипниковым щитам, обмоткам, коллектору и др.), а также к применяемым материалам.

Испытания электротехнических изделий на стойкость к воздействию климатических и механических факторов внешней среды

Специфика правил приемки изделий, обусловленная испытаниями на стойкость к воздействию климатических и механических факторов, а также методов испытаний, включающих испытательные режимы, приведены в ГОСТ 16962-71.

Уточнение и конкретизация некоторых режимов климатических испытаний приведены дополнительно в ГОСТ 15963-79 и ГОСТ 17412-72, а механических испытаний — в приложении к ГОСТ 17516-72. Перечень механических и климатических испытаний, установленных в ГОСТ 16962-71, приведен в табл. 9.14.

Виды механических испытаний в ГОСТ 16962-71 обозначены номерами с 101 по 113, а климатических испытаний — с 201 по 220.

Включенные в стандарт виды испытаний пронумерованы в порядке их изложения. Если будут разработаны новые виды испытаний, они будут обозначены в порядке их включения (продолжения).

Для каждого вида испытаний в стандарте может быть предусмотрено несколько методов. Методы проведения каждого вида испытаний обозначаются номером, соответствующим номеру данного вида испытаний, с добавлением через дефис порядковых номеров испытаний. Если в стандарте для данного вида испытаний предусмотрен только один метод, он обозначается порядковым номером один. В стандарте для ряда видов испытаний предусмотрены ускоренные методы, а для ряда видов — нормальные испытания. Нумерацией видов и методов испытаний следует пользоваться при ссылках на ГОСТ 16962-71 в стандартах на изделия.

Например, для испытания на воздействие циклической смены температур (испытание 205, табл. 9.14) в стандарте предусмотрено пять методов, в том числе метод 4, применяемый для греющихся электротехнических изделий. В технических условиях и стандартах на такие изделия записывают, что «испытание на смену температур проводят методом 205-4 по ГОСТ 16962-71».

Испытание на воздействие одиночных ударов изделий электротехники, предназначенных для установки на судах, проводят по методике и нормам, утвержденным в установленном порядке.

Испытание на брызгозащищенность изделий электротехники на напряжение до 1000 В проводят по ГОСТ 14254-80.

Таблица 9.14

Вид испытания	Номер видоиспытания по ГОСТ 16962-71	Вид испытания	Номер видоиспытания по ГОСТ 16962-71
Механические испытания		На теплостойкость при температуре транспортирования и хранения	202
Обнаружение резонансных частот	101	На холодостойкость при эксплуатации	203
На виброустойчивость	102	На холодостойкость при температуре транспортирования и хранения	204
На вибропрочность (длительное)	103	На воздействие смены температур	205
На вибропрочность (кратковременное)	103	На воздействие инея с последующим его оттаиванием	206
На ударную прочность	104	На влагостойкость, длительное или ускоренное	207
На ударную стойкость	105	На влагостойкость, кратковременное	208
На воздействие одиночных ударов	106	На воздействие пониженного атмосферного давления	209
На воздействие линейных (центробежных) нагрузок	107	На воздействие повышенного давления воздуха или другого газа	210
На воздействие акустических шумов	108	На воздействие солнечной радиации	211
Испытание выводов (выходных концов) на воздействие растягивающей силы	109	На динамическое воздействие пыли	212
Испытание гибких проволочных и ленточных выводов на изгиб	110	На статическое воздействие пыли	213
Испытание гибких лепестковых выводов на изгиб	111	Испытание на грибоустойчивость	214
Испытание гибких проволочных выводов на скручивание	112	На воздействие соляного тумана	215
Испытание резьбовых выводов на воздействие крутящего момента	113	На воздействие повышенного гидростатического давления	216
Климатические испытания		На водонепроницаемость	217
На теплостойкость при эксплуатации	201	На брызгозащищенность	218
		На каплезащищенность	219
		На водозащищенность	220

9.4. КЛАССИФИКАЦИЯ И КОДИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Современный уровень развития техники, все более углубляющиеся разделение труда и специализация привели к тому, что в создании законченных изделий участвуют десятки и сотни предприятий и организаций. Это диктует необходимость иметь единый язык — единую систему классификации и кодирования документации, изделий и материалов, построенную на единых классификационных принципах.

В настоящее время вся промышленная и сельскохозяйственная продукция включена в «Общесоюзный классификатор промышленной и сельскохозяйственной продукции (ОКП)». Классификатор имеет высшие классификационные группировки продукции (ВКГ ОКП), которые кодируются шестью цифровыми десятичными знаками (разрядами), и ассортиментную номенклатуру, т. е. конкретные наименования продукции, называющуюся идентифицированной частью (И ОКП) или внутривидовыми группировками отрасли и кодирующуюся четырьмя цифровыми десятичными знаками (разрядами).

Для продукции каждой отрасли промышленности и сельского хозяйства в ОКП определены наиболее существенные признаки, по которым осуществляется классификационное деление. Для каждого класса продукции установлен соответствующий порядок его последовательной конкретизации.

Таким образом, наименования и коды продукции в полной номенклатуре составляют 10-значный код.

В основу ОКП положена десятичная система классификации, согласно которой вся промышленная и сельскохозяйственная продукция подразделяется на 100 классов в зависимости от особенностей производства, свойств и назначения продукции. Каждый класс подразделяется на 10 подклассов, каждый подкласс — на 10 групп, каждая группа — на 10 подгрупп и каждая подгруппа — на 10 видов. Классы обозначаются двумя цифрами, а подклассы, группы, подгруппы и виды — одной. Общая структура кодового обозначения продукции в ОКП имеет структуру, представленную в табл. 9.15.

Таблица 9.15

Высшие классификационные группировки (ВКГ ОКП)	Дальнейшая конкретизация видовой группировки продукции (И ОКП)

Коды ВКГ ОКП изданы издательством «Статистика» в 1977 г. Полную номенклатуру классов промышленной продукции в отрасли разрабатывают головные организации соответствующих отраслей. В частности, по вопросам классификации электротехнических изделий головной организации является ВНИИинформэлектро.

Для классификации электротехнических изделий в ОКП выделены классы:

33 — машины электрические;

34 — оборудование и материалы электротехнические;

35 — продукция кабельная.

Каждый из указанных классов разделен на 10 подклассов по назначению и применению электротехнической продукции в соответствии со сложившейся системой планирования производства.

В связи с тем что из названных классов класс 34 является самым многономенклатурным (он включает 1847 группировок) и не имеет на уровне подклассов резервной емкости, а также в связи с необходимостью отразить сложившуюся систему планирования запасных частей для электротехнического оборудования, классификация запасных частей осуществлена в подклассе 9 класса 33.

Класс 33 — машины электрические — имеет подклассы:

331000 — машины электрические малой мощности;

332000 —электродвигатели переменного тока мощностью от 0,25 до 100 кВт;

333000 — электродвигатели переменного тока мощностью свыше 100 кВт;

334000 — электродвигатели взрывозащищенные, врубово-комбайновые и электробуры;

335000 — электродвигатели крановые и электрические машины для тягового оборудования;

336000 — машины электрические постоянного тока;

337000 — генераторы переменного тока, преобразователи, усилители электромашинные, электростанции и электроагрегаты питания;

338000 — машины электрические крупные, агрегаты электромашинные, турбо- и гидрогенераторы;

339000 — запасные части к электрическим машинам и электротехническому оборудованию.

Подобным же образом продукция, отнесенная к одному подклассу, например машины электрические малой мощности, подразделяется по определенным признакам на подгруппы:

331100 — машины электрические специализированные и т. д.

Далее продукция одной группы подразделяется на подгруппы:

331110 — электродвигатели для электробытовых приборов;

331120 — то же, не вошедшие в подгруппу 331110;

331130 — электродвигатели для звукокиноаппаратов;

331140 — электродвигатели для машин и приборов различного назначения;

331150 — электродвигатели общепромышленного применения.

Далее электродвигатели одной подгруппы подразделяют на виды:

331151 — электродвигатели серии АОЛ;

331152 — электродвигатели единой серии 4А;

331153 — электродвигатели шаговые;

331154 — серводвигатели;

331155 — электродвигатели гистерезисные.

Одним из номенклатурных классов ОКП является класс 34, который подразделяется на подклассы:

341000 — трансформаторы и трансформаторное оборудование, аппаратура высоковольтная, силовая преобразовательная техника, приборы силовые полупроводниковые, детекторы ядерных и нейтронных излучений, хемотроника (электрохимические преобразователи информации);

342000 — аппараты электрические на напряжение до 1000 В;

343000 — комплектные устройства на напряжение до 1000 В;

344000 — оборудование специальное технологическое, шинопроводы низкого напряжения;

345000 — электротранспорт (кроме средств городского транспорта и мотор-вагонных поездов), электрооборудование для электротранспорта и подъемно-транспортных машин;

346000 — оборудование светотехническое и изделия электроустановочные, лампы электрические, изделия культурно-бытового назначения и хозяйственного обихода;

348000 — источники тока химические и физические, генераторы электрохимические и термоэлектрические;

349000 — материалы и изделия электроизоляционные, электроугольные и электрометаллокерамические.

Кабельная продукция (класс 35) подразделяется на:

351000 — провода неизолированные;

352000 — кабели силовые на напряжение до 1 кВ (типов СРГ, ВРГ, НРГ);

353000 — кабели силовые на напряжение 1 кВ и выше (бронекабели);

354000 — кабели силовые гибкие (шланговые и врубовые);

355000 — провода и шнуры силовые;

356000 — кабели управления, контроля, сигнализации; кабели и провода компенсационные;

357000 — кабели, провода и шнуры связи;

358000 — кабели, провода и шнуры межотраслевого назначения;

359000 — провода эмалированные и обмоточные.

Десятиразрядный код ОКП записывается в полной (ассортиментной) номенклатуре: два знака — пробел — четыре знака — пробел — четыре знака.

Присвоение кода ОКП осуществляется согласно установленному порядку, регламентированному положением об отраслевой системе ведения общесоюзного классификатора.

9.5. СТАНДАРТИЗАЦИЯ ТЕРМИНОВ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

Стандартизация электротехнических терминов, их определений и буквенных обозначений тесно связана с развитием электротехники. Широкая электрификация, развитие электропромышленности в СССР и расширение сети электротехнических учебных заведений определили еще большую необходимость в упорядочении и унификации электротехнической терминологии для использования в производстве и в эксплуатации, в литературе, в стандартах и в другой нормативно-технической документации, а также в обучении электротехнических кадров.

Госстандарт СССР рассмотрел в 1967 г. совместно с заинтересованными министерствами и ведомствами состояние стандартизации терминологии в электротехнике и утвердил комплексный план работы в этой области на ряд лет. Этим планом была предусмотрена разработка стандартов на термины, общие для всей электротехники, и стандартов на тер-

мины для соответствующих подотраслей электротехники.

В результате выполнения указанного комплексного плана в СССР по состоянию на 1 января 1980 г. имеется серия электротехнических терминологических стандартов, насчитывающая более 30 государственнных стандартов.

Система стандартизации электротехнических терминов предусматривает введение стандарта «Электротехника, основные понятия. Термины и определения», устанавливающего термины, общие для всей электротехники, включая электронику, энергетику и электрификацию народного хозяйства. В развитие этого стандарта введены стандарты, устанавливающие термины и определения, относящиеся к различным отраслям электротехники, например стандарт «Электрооборудование. Основные понятия. Термины и определения» и стандарт «Энергетика и электрификация народного хозяйства. Основные понятия. Термины и определения».

В дополнение к указанным имеются стандарты, устанавливающие термины и определения для отдельных подотраслей электротехнической промышленности.

В ГОСТ 19880-74 «Электротехника. Основные понятия. Термины и определения», в основу которого положена рекомендация «Теоретическая электротехника. Терминология» КТТ Академии наук СССР (вып. 59. Изд-во АН СССР, 1962 г.), предусматриваются термины и основные понятия в области электромагнитных явлений; термины электрических, электронных и магнитных цепей; термины электромагнитных процессов в электрических и магнитных цепях и средах и др.

В ГОСТ 19431-74 «Энергетика и электрификация народного хозяйства. Основные понятия. Термины и определения» устанавливаются термины и определения, относящиеся к энергоснабжению и электроснабжению; видам электрических станций; линиям электропередачи, электрическим сетям и тепловым сетям; видам приемников и потребителей энергии; характеристикам производства и потребления электроэнергии и тепловой энергии и т. д.

В ГОСТ 18311-80 «Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий» даны общие понятия, виды электротехнических изделий, устройств и оборудования, параметры, свойства и характеристики.

В стандартах на термины и определения для соответствующих подотраслей электротехники, а именно: на электрические машины, трансформаторы, электрические аппараты, электротермические установки, магнитные усилители, химические источники тока, кабели и провода, электротехнические материалы, бытовые электрические приборы и др., как правило, даны разделы — общие понятия, конструктивные элементы (части) изделий, режимы, параметры и характеристики или свойства изделий, условия эксплуатации и т. д.

Во многих стандартах на термины и определения той или иной подотрасли электротехники даны в виде приложения общие понятия, взятые из стандартов, относящихся ко всей электротехнике (для справок), без которых термины и определения данной подотрасли понимать будет затруднительно.

В ряде стандартов на термины и определения одновременно установлена принципиальная классификация видов электротехнических изделий данной подотрасли (в виде разделов в стандартах).

В отдельных стандартах, кроме того, дается в виде приложения графическое изображение (график) классификации видов изделий в данной подотрасли электротехники (например, такой график приведен в виде приложения к ГОСТ 18624-73 «Реакторы электрические. Термины и определения»), или другие графические материалы, например в ГОСТ 16703-79 «Приборы и комплексы световые. Термины и определения» в приложении даны чертежи плоскостей (меридиональная, экваториальная и др.) и защитных углов светильников.

В отдельных подотраслях электротехники стандартизованы (в виде отдельного стандарта) термины и определения деталей и сборочных единиц, например ГОСТ 21888-88 «Щетки, щеткодержатели, коллекторы и контактные кольца электрических машин. Термины и определения».

Для отдельных стандартизованных терминов в стандарте приведены в качестве справочных их краткие формы, которые разрешается применять в случае, если исключена возможность их различного толкования.

В ГОСТ 1494-77 «Электротехника. Буквенные обозначения основных величин» приведены кроме буквенных обозначений наиболее употребительные индексы (см. § 2.9).

9.6. НАДЕЖНОСТЬ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В области надежности, технического обслуживания и ремонта электротехнических изделий основополагающими являются три стандарта: ГОСТ 27.002-83 «Надежность в технике, термины и определения»; ГОСТ 27.503-81 «Методы оценки показателей надежности» и ГОСТ 22952-78 «Система технического обслуживания и ремонта техники».

Сформулируем основные термины и определения, вытекающие из названных выше стандартов.

Надежностью называется свойство изделий выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения эксплуатационных показателей в установленных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки.

Показателем надежности назовем величину, характеризующую одно или несколько свойств, составляющих надежность изделия.

Надежность характеризуется безотказностью, долговечностью, ремонтопригодностью и сохраняемостью изделий. Показатели производительности, расхода электроэнергии, топлива и т. п. называются эксплуатационными показателями.

Свойство изделия сохранять работоспособность в течение заданного времени определяет его *безотказность,* а его свойство оставаться работоспособным до наступления

предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта называется *долговечностью*. *Сохраняемостью* изделия называется его свойство непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения (транспортировки).

Важными эксплуатационными свойствами электротехнических изделий являются свойства их *ремонтопригодности* и *восстанавливаемости*.

Под ремонтопригодностью понимают свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, обнаружению отказов и восстановлению работоспособности и исправности. Свойство изделия, обеспечивающее возможность полного или частичного восстановления его работоспособности или исправности, называют восстанавливаемостью. Состояние изделия считается исправным, если оно соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией. Работоспособным состоянием изделия называется такое его состояние, при котором изделие способно выполнять заданные функции, сохраняя значения параметров в пределах, определяемых нормативно-технической документацией. Событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия, называется его *отказом*.

Назовем отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одного или нескольких заданных параметров изделия, внезапным, а отказ, характеризующийся постепенным изменением одного или нескольких заданных параметров изделия, постепенным.

Изделие или его элемент, работоспособность которого в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению в условиях эксплуатации, называется невосстанавливаемым. Если работоспособность изделия при возникновении отказа подлежит восстановлению в заданных к условиях эксплуатации, то такое изделие называют восстанавливаемым.

Одним из важных методов повышения надежности изделия в процессе эксплуатации является *резервирование* — введение избыточности (дополнительных средств сверх минимально необходимых для выполнения изделием заданных функций). Различают три вида резерва: нагруженный (резервные элементы находятся в том же режиме, что и основные), облегченный резерв (резервные элементы находятся в менее нагруженном режиме, чем основные) и ненагруженный резерв (резервные элементы практически не несут нагрузок).

Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых или основных элементов изделия называют *кратностью резервирования*. Наиболее распространенным на практике случаем резервирования является *дублирование*, при котором кратность резервирования равна единице.

В процессе эксплуатации изделий имеет место резервирование с восстановлением и резервирование без восстановления. В первом случае работоспособность любого основного и резервного элемента изделия при возникновении отказов подлежит восстановлению. При резервировании без восстановления работоспособность любого основного и резервного элемента при возникновении отказов восстановлению не подлежит.

В теории надежности конкретное электротехническое оборудование может рассматриваться либо как элемент, либо как система. Под системой понимается объект, представляющий собой совокупность элементов, взаимодействующих в процессе выполнения определенного круга задач и взаимосвязанных функционально. Элементом системы считается объект, представляющий собой простейшую часть системы, отдельные части которого не представляют самостоятельного интереса в рамках конкретного рассмотрения. Как элемент, так и система могут быть восстанавливаемыми либо невосстанавливаемыми.

9.7. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Показатели надежности невосстанавливаемых систем

В данном разделе будем исходить из того, что элемент начинает эксплуатироваться с момента времени $t=0$ и в этот момент он является исправным. Через некоторое время $t>0$ может произойти отказ элемента, хотя его условия функционирования остаются допустимыми. Будем рассматривать поведение элемента от момента времени $t=0$ до момента его первого отказа.

Интервал времени от $t=0$ до момента T первого отказа назовем наработкой рассматриваемого элемента до отказа. Поскольку на наработке отдельного элемента до отказа сказываются случайные факторы, воздействия которых не удается избежать в условиях производства, то величину T естественно считать случайной. Распределение случайной величины (СВ) T можно задать с помощью функции распределения (ФР)

$$F(t) = P\{T < t\},$$

где $P\{\cdot\}$ — вероятность события $\cdot$, или плотности распределения (предполагается, что СВ T непрерывна)

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t).$$

Для большинства основных показателей надежности невосстанавливаемого элемента существует вероятностное и статистическое определения. При рассмотрении статистических показателей надежности невосстанавливаемых элементов предполагается такая схема испытаний или эксплуатации этих элементов, когда какое-то число элементов работает до полного отказа. В этом случае статистические показатели в пределе с ростом числа испытываемых элементов будут сходиться (по вероятности) к аналогичным вероятностным показателям.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ — вероятность того, что элемент проработает безотказно в интервале времени $(0, t)$, т. е.

$$P(t) = P\{T > t\} = 1 - F(t).$$

Статистическая оценка $\hat{P}(t)$ вероятности безотказной работы представляет собой отно-

шение числа элементов $N(t)$, безотказно проработавших до момента времени t, к числу элементов $N(0)$, исправных в начальный момент времени $t=0$, т. е.

$$\hat{P}(t) = N(t)/N(0) = 1 - n(t)/N(0).$$

Вероятность отказа элемента $Q(t)$ — вероятность того, что элемент откажет в интервале времени $(0, t)$, т. е.

$$Q(t) = P\{T < t\} = F(t).$$

Статистическая оценка

$$\hat{Q}(t) = n(t)/N(0).$$

Вероятность безотказной работы элемента $P(t_0, t)$ в интервале времени (t_0, t) — условная вероятность того, что элемент проработает безотказно в интервале времени (t_0, t) при условии, что элемент уже проработал безотказно до момента времени t_0, т. е.

$$P(t_0, t) = P\{T \geqslant t \mid T \geqslant t_0\} = P(t)/P(t_0).$$

Статистическая оценка $\hat{P}(t_0, t)$ представляет собой отношение числа элементов $N(t)$, проработавших до момента времени t, к числу элементов $N(t_0)$, исправных в момент времени t_0, т. е.

$$\hat{P}(t_0, t) = N(t)/N(t_0).$$

Вероятность отказа элемента $Q(t_0, t)$ в интервале времени (t_0, t) — условная вероятность того, что элемент откажет в интервале времени (t_0, t) при условии, что элемент уже проработал безотказно до момента времени t_0, т. е.

$$Q(t_0, t) = P\{T < t \mid T \geqslant t_0\} = 1 - P(t)/P(t_0).$$

Статистическая оценка

$$\hat{Q}(t_0, t) = \frac{n(t) - n(t_0)}{N(t)} = 1 - N(t)/N(t_0) = \frac{\Delta n(t_0, t)}{N(t)},$$

где $n(t_0)$, $n(t)$ — число отказавших элементов за время t_0, t соответственно; $\Delta n(t_0, t)$ — число отказавших элементов именно в интервале времени (t_0, t).

Интенсивность отказов элемента в момент времени t — условная плотность вероятности отказа элемента к моменту времени t при условии, что до этого момента отказ элемента не произошел, т. е.

$$\lambda(t)\,dt = P\{t < T < t + dt \mid T > t\} = \frac{P\{t < T < t + dt\}}{P\{T > t\}} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}\,dt,$$

откуда следует, что

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}.$$

Обратное выражение вероятности безотказной работы через интенсивность отказов

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^\infty \lambda(x)\,dx\right].$$

Статистическая оценка $\hat{\lambda}(t)$ — отношение числа отказов $\Delta n(t, \Delta t)$ в интервале времени $(t, t+\Delta t)$ к произведению числа исправных элементов $N(t)$ в момент времени t на длительность интервала времени Δt, т. е.

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(t)\,\Delta t} = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t)\,\Delta t} = \frac{\Delta n(t + \Delta t)}{N(t)\,\Delta t},$$

где $n(t+\Delta t)$, $n(t)$ — числа элементов, отказавших к моментам времени $t+\Delta t$, t.

Среднее время τ и дисперсия σ^2 времени работы элемента до отказа (или средняя *наработка до отказа* и дисперсия наработки до отказа):

$$\tau = M\{T\} = \int_0^\infty x f(x)\,dx = \int_0^\infty P(x)\,dx,$$

$$\sigma^2 = M\{(T - \tau)^2\} = \int_0^\infty t^2 f(x)\,dx - \tau^2.$$

Показатели надежности восстанавливаемых систем

Здесь приводятся показатели, специфичные только для восстанавливаемых элементов. Отметим, однако, что для восстанавливаемых элементов применимы также показатели надежности невосстанавливаемых элементов, приведенные выше.

Процесс эксплуатации восстанавливаемого элемента можно представить как последовательность интервалов работоспособности, чередующихся с интервалами простоя. Наибольший практический интерес вызывают такие случаи, когда все интервалы работоспособности имеют одинаковое распределение $F(t)$, а все интервалы простоя (или восстановления) — распределение $F_в(t)$. Именно такие случаи рассматриваются в дальнейшем.

Обозначим через $T_в$ — случайное время восстановления с функцией распределения $F_в(t)$ и плотностью $f_в(t)$. Тогда по аналогии с определением показателей τ и $\lambda(t)$ можно определить среднее время простоя (восстановления) элемента $\tau_в$ и интенсивность восстановления $\mu(t)$:

$$\tau_в = M\{T_в\} = \int_0^\infty x f_в(x)\,dx = \int_0^\infty [1 - F_в(x)]\,dx;$$

$$\mu(t) = \frac{f_в(t)}{1 - F_в(t)}.$$

Нестационарный коэффициент готовности $K(t)$ — вероятность того, что в момент t элемент находится в состоянии работоспособности, т. е.

$$K(t) = \sum_{i=1}^\infty P\left\{\sum_{k=0}^{i}\left(T^{(k)} + T_в^{(k)}\right) < t < \sum_{k=0}^{i}\left(T^{(k)} + T_в^{(k)}\right) + T^{(i+1)}\right\},$$

где $T^{(1)}$, $T^{(2)}$, ..., $T^{(k)}$ ... — последовательность длительностей интервалов работоспособности; $T_в^{(1)}$, $T_в^{(2)}$, ..., $T_в^{(k)}$ ... — последовательность длительности интервалов простоя.

Статистическая оценка $\hat{K}(t)$ — отношение числа исправных элементов $N(t)$ в момент времени t к общему числу элементов $N(0)$, т. е.

$$\hat{K}(t) = N(t)/N(0) = 1 - n(t)/N(0),$$

где $n(t)$ — число элементов, находящихся в момент времени t в состоянии отказа.

Коэффициент готовности элемента K — вероятность нахождения элемента в состоянии работоспособности для стационарного случайного процесса (т. е. в произвольный «достаточно удаленный» момент времени):

$$K = \lim_{t\to\infty} K(t).$$

Для любых распределений $F(t)$ и $F_в(t)$, имеющих конечные средние значения τ и $\tau_в$ соответственно, можно записать

$$K = \tau/(\tau + \tau_в).$$

Статистическая оценка $\hat{K}$ — отношение числа элементов $N(t_\infty)$, находящихся в состоянии работоспособности в произвольный достаточно удаленный момент времени, к общему числу элементов, т. е.

$$\hat{K} = N(t_\infty)/N(0) = 1 - n(t_\infty)/N(0),$$

где $n(t_\infty)$ — число элементов, находящихся в состоянии отказа в «достаточно удаленный» момент времени.

Нестационарный коэффициент простоя $k(t)$ — вероятность того, что в момент времени t элемент находится в состоянии отказа. Очевидно, что

$$k(t) = 1 - K(t), \quad \hat{k}(t) = n(t)/N(0).$$

Коэффициент простоя k — вероятность нахождения элемента в состоянии отказа для стационарного случайного процесса (т. е. в достаточно удаленный момент времени). Очевидно, что

$$k = 1 - K, \quad \hat{k} = n(t_\infty)/N(0).$$

Выбор законов распределения наработки до отказа и времени восстановления электротехнических изделий

Тип закона распределения наработки до отказа и времени восстановления можно найти двумя путями — статистически, проверив гипотезу о принадлежности распределения данному параметрическому классу, и физически, построив физическую модель отказа и исследовав ее математическими методами.

На современном уровне развития теории надежности строгое теоретическое (физико-математическое) обоснование рассматриваемых законов распределения, как правило, не реализуется; здесь можно говорить лишь о наиболее рациональных с той или иной точки зрения аппроксимации указанных законов, эффективность применения которых базируется на сочетании нестрогой качественной теории, эвристических соображениях и данных эксперимента; при этом на выбор аппроксимации в значительной степени влияет также естественное стремление к упрощению расчета надежности системы. Среди множества находящих применение законов распределения рассмотрим лишь два наиболее популярных.

Экспоненциальный закон — закон «нестареющих», точнее, не «помнящих» своего прошлого элементов; иначе говоря, вся предшествующая работа элемента не оказывает никакого влияния на его показатели надежности в последующие интервалы времени. Указанное свойство является характеристическим, т. е. присуще только экспоненциальному закону. Необходимое условие для аппроксимации функции распределения наработки до отказа экспоненциальным законом — исключение этапов приработки и старения из рассматриваемого интервала нормальной эксплуатации объекта.

Экспоненциальным законом называют распределение вида [9.5, 9.12]

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda(t)},$$

для которого $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, $\lambda(t) \equiv \lambda$, $\tau = \lambda^{-1}$, $\sigma^2 = \lambda^{-2}$, $P(t_0, t) = e^{-\lambda(t-t_0)}$, $t \geqslant t_0$.

Следует подчеркнуть, что если величина λ как дифференциальный параметр экспоненциального закона имеет реальный физический смысл, то это несправедливо в отношении $\tau = \lambda^{-1}$ как интегрального параметра закона распределения. Например, статистическая оценка интенсивности отказов порядка $\lambda = 10^{-8}$ ч$^{-1}$ в силу эргодичности процесса может быть получена путем испытания, скажем, 10^4 компонентов в течение 10^4 ч (т. е. примерно одного года); с другой стороны, формально определенная средняя наработка до отказа составит $\tau = \lambda^{-1} = 10^8$ ч $\approx 10^4$ лет, что лишено физического смысла; причина данного противоречия — пренебрежение явлением старения, которое в той или иной степени присуще любому физическому объекту; сказанное тем не менее не обессмысливает аппроксимацию экспоненциальным законом, коль скоро последняя аппроксимирует рассматриваемый процесс лишь на ограниченном относительно малом (малом по отношению к τ) интервале времени: для высоконадежных элементов длительность нормальной эксплуатации всегда много меньше средней наработки до отказа. Таким образом, в случае экспоненциального закона при достаточно малой интенсивности отказов среднюю наработку до отказа следует понимать как чисто расчетную величину, формально равную обратному значению интенсивности отказов.

Для многих типов электротехнических элементов на обширном статистическом материале установлена кривая интенсивности отказов по рис. 9.1. По характеру поведения интенсивности отказа вся ось времени может быть разбита на три участка. На первом $(0, t_1)$ интенсивность имеет повышенное значение. Это объясняется тем, что в любой большой партии элементов, поставленных на испытания, всегда имеются дефектные элементы, которые отказывают вскоре после начала испытаний. За счет их отказов интенсивность и будет на этом участке велика. На втором участке (t_1, t_2) ин-

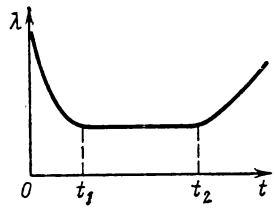


Рис. 9.1

тенсивность отказов приблизительно постоянна. Это — период нормальной работы. Наконец, последний участок (t_2, ∞) — период старения. К этому времени в элементах происходят необратимые физико-химические изменения, элементы стареют, изнашиваются, их надежность снижается, т. е. интенсивность отказа монотонно возрастает.

Во многих радиоэлектронных, электротехнических элементах период старения наступает через большой промежуток времени, а период приработки (0, t_1) практически отсутствует за счет предварительных испытаний и замены дефектных элементов новыми, поэтому в данном случае можно пользоваться экспоненциальным распределением.

Как показывает теория и эксперимент, значения λ существенным образом зависят от физико-химических условий работы объекта: $\lambda = \lambda(w)$, где w — множество факторов, характеризующих условия эксплуатации объекта; наиболее существенные из них — окружающая температура, электрические и механические нагрузки, радиационные воздействия. Конкретизация функций $\lambda=\lambda(w)$ применительно к электротехническим объектам наиболее полно представлена в [9.13, 9.15].

Нормальный закон — один из наиболее употребительных законов, отображающих старение элемента. Функция распределения этого закона задается в виде:

$$F(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{t}\exp\left[-\frac{(x-\tau)^2}{\sigma^2}\right]dx,$$

где $\tau=M\{T\}$, $\sigma^2=M\{(T-\tau)^2\}$. Значение $F(t)$ отлично от нуля при $t>-\infty$, в то время как функция распределения наработки до отказа определена только для $t\geqslant 0$ и при этом должно выполняться условие $F(0)=0$ и $F(\infty)=1$. Поэтому в теории надежности используется усеченный нормальный закон [9.6].

Но поскольку во многих реальных электротехнических элементах среднее время наработки до отказа τ гораздо больше, чем среднее квадратическое отклонение σ, то для таких элементов можно принять обычный нормальный закон. Интенсивность отказов $\lambda(t)$ нормального закона, монотонно возрастая, приближается к $(t-\tau)/\sigma$.

Обычно нормальный закон можно использовать, если плотность $f(t)$ имеет симметричный вид и $\sigma\ll\tau$. Сказанное выше относительно зависимости интенсивности отказов экспоненциального закона $\lambda=\lambda(w)$ от множества факторов, характеризующих условия эксплуатации элемента, остается справедливым и для параметров $\tau(w)$, $\sigma(w)$ нормального закона.

Помимо рассмотренных законов в теории надежности используются также следующие законы распределения: Вейбулла, гамма, логарифмически нормальное [9.5—9.7, 9.10, 9.12]. Методы получения статистических оценок параметров перечисленных выше распределений нормированы в [9.4].

Расчет надежности невосстанавливаемых систем

Одним из основных типов систем без восстановления являются так называемые последовательные и параллельные системы. Последовательные системы — это такие системы, отказ хотя бы одного элемента которых приводит к отказу всей системы, а параллельные системы — это такие системы, которые работают нормально до тех пор, пока остается работоспособным хотя бы один элемент.

Для невосстанавливаемой последовательной системы из n элементов $F_i(t)$ будет функцией распределения наработки до отказа i-го элемента и все элементы этой системы являются независимыми, т. е. отказ каждого из них не зависит от того, в каком состоянии находятся другие элементы. Тогда вероятность безотказной работы $P(t)$ всей системы за время t равна

$$P(t)=\prod_{i=1}^{n}P_i(t),$$

где $P_i(t)=1-F_i(t)$. В случае, когда $P_i(t)=e^{-\lambda_i t}$,

$$P(t)=e^{-\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t}.$$

Если система состоит из достаточно надежных элементов, т. е. $P_i(t)\approx 1-\lambda_i t$, то

$$P(t)\approx 1-\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t.$$

Среднее время безотказной работы последовательной системы

$$\tau=\int_0^{\infty}P(t)\,dt=1/\sum_{i=1}^{n}\tau_i^{-1},$$

где τ_i — среднее время работы i-го элемента до отказа.

В случае экспоненциального распределения $\tau_i=\lambda_i^{-1}$, следовательно,

$$\tau=1/\sum_{i=1}^{n}\lambda_i.$$

Пример 1. Пусть электротехническое изделие состоит из 10 элементов. Интенсивности отказов каждого элемента считаются постоянными (т. е. справедлив экспоненциальный закон распределения для каждого элемента)

Номер элемента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Интенсивность отказов, 10^3 ч$^{-1}$	1	5	0,9	0,1	4	6	2	2	7	2

Необходимо найти вероятность безотказной работы за 1 ч и 6 ч и среднее время работы системы до отказа:

$$P(t=1\text{ч})=0{,}97;\quad P(t=6\text{ч})=0{,}82;$$

$$\tau=33{,}3\text{ ч}.$$

Данные по интенсивности отказов приводятся в справочной литературе.

В невосстанавливаемой параллельной системе из n элементов, в которой все элементы независимы, вероятность безотказной работы системы

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_i(t)).$$

Если система состоит из достаточно надежных элементов, т. е. $P_i \approx 1 - \lambda_i t$, то

$$P(t) \approx 1 - t^n \prod_{i=1}^{n} \lambda_i.$$

В частности, если последовательно соединить m параллельных групп элементов, то общая вероятность безотказной работы такой системы будет подчиняться закону Вейбулла

$$P(t) = (1 - \lambda t)^m \approx e^{-m\lambda t^n},$$

где $\lambda = \prod_{i=1}^{n} \lambda_i$.

Среднее время безотказной работы параллельной системы можно найти по общей формуле; для экспоненциального распределения оно имеет следующий вид:

$$\tau = \sum_{1 \leqslant i \leqslant n} (1/\lambda_i) - \sum_{1 \leqslant i < j \leqslant n} 1/(\lambda_i + \lambda_j) + \ldots$$
$$\ldots + \sum_{1 \leqslant i < j < k \leqslant n} 1/(\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k) - \ldots$$
$$\ldots + (-1)^n / \sum_{1 \leqslant i \leqslant n} \lambda_i.$$

Многие системы имеют такую структуру соединения (или взаимодействия), которая не сводится к параллельно-последовательным либо последовательно-параллельным схемам. Примером такой системы может служить мостовая схема (рис. 9.2).

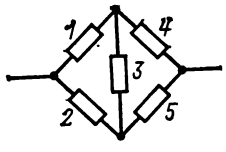


Рис. 9.2

В общем случае такие системы представляют собой сети и более сложной конфигурации. На практике к подобным системам можно отнести информационные системы, системы связи, некоторые электротехнические системы, системы управления территориально разнесенными объектами и т. п.

Системы могут находиться в двух состояниях: состоянии работоспособности и состоянии отказа. Состояние системы обозначим символом φ, который принимает значение 1, если система работоспособна, и 0, если она отказала. Состояние i-го элемента системы обозначим символом x_i, который принимает значение 1, если i-й элемент исправен, и значение 0, если он отказал ($i = 1, 2, \ldots, n$).

Состояние системы зависит от состояния элементов системы, т. е. $\varphi = \varphi(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Функция $\varphi(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ называется структурной функцией системы. Для реальных систем имеют место следующие соотношения: $\varphi(0, 0, \ldots, 0) = 0$, $\varphi(1, 1, \ldots, 1) = 1$ и $\varphi(x_1, x_2, \ldots, x_n) \geqslant \varphi(y_1, y_2, \ldots, y_n)$ при условии, что $x_i \geqslant y_i$, ($i = 1, 2, \ldots, n$). Физически последнее условие означает, что отказ элемента не может перевести систему из неисправного состояния в исправное. Для таких систем имеются разнообразные методы расчета и оценки надежности [9.7, 9.8].

Наиболее простым методом расчета вероятности безотказной работы указанных систем из n элементов (при малом n) является метод прямого перебора. При этом если известен критерий отказа системы, то все множество состояний элементов $E = \{(x_1, x_2, \ldots, x_n)\}$ разбивается на два подмножества: подмножество состояний работоспособности E_1 и подмножество состояний отказов E_0. Тогда, если для каждого состояния системы $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ вычислить его вероятность p_x, вероятность состояния работоспособности системы в целом можно записать как

$$P = P\{x \in E_1\} = \sum_{x \in E_1} p_x,$$

а вероятность отказа системы

$$Q = P\{x \in E_0\} = \sum_{x \in E_0} p_x.$$

Если система состоит из взаимно независимых элементов, то

$$p_x = \prod_{i=1}^{n} p_{x_i},$$

где p_{x_i} — вероятность состояния x_i.

Пример 2. Найдем вероятность безотказной работы (ВБР) мостовой схемы рис. 9.2. Для этого разобьем множество состояний E на подмножества E_1 и E_0:

$$(0, 0, 0, 0, 0) \in E_0, \quad (0, 0, 0, 0, 1) \in E_0, \ldots$$
$$\ldots, (0, 1, 1, 1, 1) \in E_1.$$

Вероятность состояния $(1, 0, 0, 0, 1) \in E_0$ равна $p_1 q_2 q_3 q_4 p_5$, а вероятность состояния $(1, 0, 1, 0, 1) \in E_1$ равна $p_1 q_2 p_3 q_4 p_5$ ($q_i = 1 - p_i$, $i = \overline{1,5}$). Зная вероятность каждого состояния, можно определить ВБР системы или вероятность отказа.

Если $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p$, то

$$P = p^5 + 5qp^4 + 8q^2p^3 + 2q^3p^2, \qquad (9.6)$$

где $q = 1 - p$.

Пусть $p(t = t_{\text{заданное}}) = 0{,}9$. Тогда

$$P(t = t_{\text{заданное}}) = (0{,}9)^5 + 5\,(0{,}1)\,(0{,}9)^4 + 8\,(0{,}1)^2 + 2\,(0{,}9)^3 + 2\,(0{,}1)^3\,(0{,}9)^2 = 0{,}97848.$$

Зная ВБР $P = p(t)$, можно вычислить и среднее время работы системы до отказа по общей формуле.

Легко видеть, что методом прямого перебора можно рассчитать надежность лишь систем, состоящих из небольшого числа элементов. Более универсальным является метод минимальных путей и минимальных сечений. В монотонных структурах минимальный путь представляет собой минимально возможное множество элементов, которое обеспечивает нормальное функционирование системы. Минимальное сечение — это минимально возможное множество элементов, отказ которых приводит к отказу системы [9.5, 9.16].

У систем с произвольной структурой может быть несколько минимальных путей и минимальных сечений. Обозначим i-й минимальный

путь ($i=1, 2, ..., l$) через α_i, а j-е минимальное сечение ($j=1, 2, ..., n$) через β_j. Пусть A_i — событие, состоящее в том, что все элементы i-го минимального пути находятся в состоянии работоспособности, а β_j — событие, состоящее в том, что все элементы j-го минимального сечения находятся в состоянии отказа. Тогда имеют место следующие формулы:

$$P(t) = P\left\{\bigcup_{i=1}^{l} A_i\right\};$$

$$Q(t) = P\left\{\bigcup_{j=1}^{m} B_j\right\}.$$

Если система имеет небольшое число минимальных путей или минимальных сечений, то вероятности $P(t)$ или $Q(t)$ можно рассчитать по формулам:

$$P(t) = \sum_{i=1}^{l} P\{A_i\} - \sum_{i<j} P\{A_i A_j\} + \sum_{i<j<k} P\{A_i A_j A_k\} - \ldots + (-1)^{l-1} P\{A_1 A_2 \ldots A_l\};$$

$$Q(t) = \sum_{j=1}^{m} P\{B_j\} - \sum_{i<j} P\{B_i B_j\} + \sum_{i<j<k} P\{B_i B_j B_k\} - \ldots + (-1)^{m-1} P\{B_1 B_2 \ldots B_m\}.$$

Отсюда получаются следующие оценки:

$$\sum_{i=1}^{l} P\{A_i\} - \sum_{i<j} P\{A_i A_j\} \leqslant P(t) \leqslant \sum_{i=1}^{l} P\{A_i\};$$

$$\sum_{i=1}^{m} P\{B_i\} - \sum_{i<j} P\{B_i B_j\} \leqslant Q(t) \leqslant \sum_{i=1}^{m} P\{B_i\}.$$

Кроме того, для ВБР $P(t)$ имеет место оценка:

$$\prod_{k=1}^{m}\left[1 - \prod_{i \in \beta_k}(1 - p_i(t))\right] \leqslant P(t) \leqslant 1 - \prod_{j=1}^{l}\left(1 - \prod_{i \in \alpha} p_i(t)\right).$$

Если $p_i = e^{-\lambda_i t}$, то для среднего времени работы до отказа системы в целом можно получить верхнюю оценку:

$$\tau \leqslant \sum_{1 \leqslant j \leqslant l} T_{\alpha_j} - \sum_{1 \leqslant j < k \leqslant l} 1/(\lambda_{\alpha_j} + \lambda_{\alpha_k}) + \sum_{1 \leqslant j < k < i \leqslant l} 1/(\lambda_{\alpha_j} + \lambda_{\alpha_k} + \lambda_{\alpha_i}) + \ldots + (-1)^{l-1} 1/\sum_{1 \leqslant j \leqslant l} \lambda_{\alpha_j},$$

где $T_{\alpha_j} = 1/\sum_{i \in \alpha_j} \lambda_i$ — среднее время работы до отказа j-го пути; $\lambda_{\alpha_j} = 1/T_{\alpha_j} = \sum_{i \in \alpha_j} \lambda_i$.

Пример 3. Рассмотрим схему (рис. 9.2). Эта схема имеет четыре минимальных пути: $\alpha_1 = \{a_1, a_4\}$, $\alpha_2 = \{a_2, a_5\}$, $\alpha_3 = \{a_1, a_3, a_5\}$, $\alpha_4 = \{a_2, a_3, a_4\}$ и четыре минимальных сечения: $\beta_1 = \{a_1, a_2\}$, $\beta_2 = \{a_4, a_5\}$, $\beta_3 = \{a_1, a_3, a_5\}$, $\beta_4 = \{a_2, a_3, a_4\}$.

Вычислим верхнюю оценку ВБР $P = P(t)$ и нижнюю оценку вероятности отказа $Q = Q(t)$ в предположении, что все элементы независимы:

$$P = \sum_{i=1}^{4} P\{A_i\} = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4;$$

$$Q \leqslant \sum_{i=1}^{4} P\{B_i\} - P\{B_1 B_2\} - P\{B_1 B_3\} - P\{B_1 B_4\} - P\{B_2 B_3\} - P\{B_2 B_4\} - P\{B_3 B_4\} =$$

$$= q_1 q_2 + q_4 q_5 + q_1 q_3 q_5 + q_2 q_3 q_4 - q_1 q_2 q_4 q_5 - q_1 q_2 q_3 q_5 - q_1 q_2 q_3 q_4 - q_1 q_3 q_4 q_5 - q_2 q_3 q_4 q_5 + q_1 q_2 q_3 q_4 q_5.$$

Пусть $p_i(t = t_{\text{заданное}}) = p(t = t_{\text{заданное}}) = 0{,}9 (i = 1, 2, ..., 5)$. Тогда, вычисляя верхнюю и нижнюю оценки $P(t = t_{\text{заданное}})$, получаем

$$0{,}9781 \leqslant P(t = t_{\text{заданное}}) \leqslant 0{,}9973.$$

Пример 4. Рассмотрим расчет надежности ВБР системы со структурой, не сводящейся к последовательно-параллельной или параллельно-последовательной схеме, а именно мостового выпрямителя, электрическая схема которого приведена на рис. 9.3. Пусть диоды *VD1—VD4* выбраны с бо́льшим в 2 раза номинальным током, а емкость конденсатора — в 2 раза выше номинальной. Предположим, что в элементах *VD1—VD4* и *C* происходят отказы типа «обрыв». Нагрузка *R* считается абсолютно надежной и в дальнейшем не учитывается. Мостовой выпрямитель считается исправным, если исправен конденсатор и исправны диоды хотя бы одного плеча (под плечом понимается совокупность диодов, образующих путь *AB* или путь *BA*). В рассматриваемом выпрямителе путь *AB* образует элементы *VD1*, *C* и *VD4*, а путь *BA* — элементы *VD3*, *C* и *VD2*. Эквивалентная схема расчета надежности мостового выпрямителя показана на рис. 9.4, где направленные ребра *1*, *2*, *4*, *5* соответствуют *VD1—VD4*, а ненаправленное ребро *3* соответствует *C*. В данном случае система считается исправной, если исправны все элементы пути *AB* или все элементы пути *BA*. Разобьем множество состояний E на подмножества E_1 и E_0: $(0, 0, 0, 0, 0) \in E_0$, $(0, 0, 0, 0, 1) \in E_0, ..., (1, 1, 1, 1, 0) \in E_1$, $(1,1,1,1,1) \in E_1$.

Предположим, что все элементы взаимно независимы. Вычислим вероятность каждого состояния множества E_1. Так, вероятность состояния $(1, 0, 1, 0, 1) \in E_1$ равна $p_1(t)q_2(t)p_3(t)q_4(t)p_5(t)$, а вероятность состояния $(0, 1, 1, 1, 0) \in E_1$ равна $q_1(t)p_2(t)q_3(t)p_4(t)q_5(t)$, где $q_i(t) = 1 - p_i$. Если $p_1(t) = p_2(t) = p_4(t) = p_5(t) = p(t)$, а $p_3(t) = r(t)$, то

$$P(t) = p^2(t)\,q^2(t)\,r(t) + 2p^3(t)\,q(t)\,r(t) + p^4(t)\,r(t) + p^2(t)\,q^2(t)\,r(t) + 2p^3(t)\,q(t)\,r(t) = p^2(t)\,r(t)\,[2 - p^2(t)].$$

Пусть $t = 10\,000$ ч, $p(t) = 0{,}9$, $r(t) = 0{,}8$. Тогда $P(t) = 0{,}77012$.

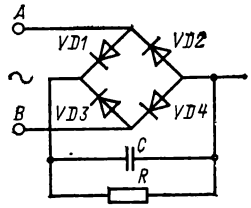


Рис. 9.3

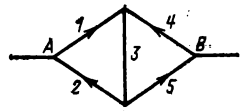


Рис. 9.4

Пример 5. Рассмотрим схему мостового выпрямителя (рис. 9.3 и 9.4) и вычислим для нее нижнюю оценку $P(t)$ и верхнюю оценку $Q(t)$. Для этого определим сначала все минимальные пути и минимальные сечения. Легко видеть, что в данной системе имеется два минимальных пути: $\alpha_1=\{1, 3, 5\}$ и $\alpha_2=\{2, 3, 4\}$ и пять минимальных сечений: $\beta_1=\{3\}$, $\beta_2=\{1, 2\}$, $\beta_3=\{4, 5\}$, $\beta_4=\{1, 4\}$ и $\beta_5=\{2, 5\}$. Поэтому

$$P(t) \geqslant P\{A_1\}+P\{A_2\}-P\{A_1, A_2\}=$$
$$=p^2(t)\,r(t)+p^2(t)\,r(t)-p^4(t)\,r(t)=$$
$$=p^2(t)\,r(t)\,[2-p^2(t)];$$

$$Q(t) \leqslant \sum_{i=1}^{5} P\{B_i\}=1-r(t)+4\,[1-p(t)]^2$$

Подставляя в последние формулы численные значения $p(t)=0{,}9$, $r(t)=0{,}8$ при $t=10\,000$ ч, получаем

$$P(t) \geqslant 0{,}77012, \quad Q(t) < 0{,}24.$$

В данном случае нижняя оценка $P(t)$ в точности равна ее истинному значению, а верхняя оценка $Q(t)$ отличается от истинного значения на 0,01012.

Удобным методом расчета надежности систем с монотонными структурными функциями является так называемый логико-вероятностный метод [9.7, 9.8], основанный на элементарных разделах теории вероятности и булевой алгебры.

Структурная функция надежности (СФН) системы является функцией алгебры логики (ФАЛ). Функция СФН позволяет для любого набора работоспособных и отказавших элементов системы (т. е. для любой допустимой реализации множества x) определить, является ли система работоспособной или отказавшей, следовательно, СФН задает структурную связь между элементами системы с точки зрения ее надежности, иначе говоря, однозначно определяет надежностную структуру системы. СФН может быть задана любым из известных способов задания ФАЛ: С — словесное описание, Т — таблица, Ф — формула булевой алгебры. Пример С: система состоит из трех элементов и сохраняет работоспособность тогда и только тогда, когда работоспособно не менее двух любых ее элементов (например, трехсекционная система эскалаторов метро); Т: см. табл. 9.16; Ф: $\varphi=x_1\wedge x_2\vee x_1\wedge x_3\vee x_2\wedge x_3=(x_1\vee x_2)\wedge(x_1\vee x_3)\wedge(x_2\vee x_3)=x_1\wedge x_2\wedge x_3\vee\bar{x}_1\wedge x_2\wedge x_3\vee x_1\wedge\bar{x}_2\wedge x_3\vee x_1\wedge x_2\wedge\bar{x}_3=(x_1\vee x_2\vee x_3)\wedge(\bar{x}_1\vee x_2\vee x_3)\wedge(x_1\vee\bar{x}_2\vee x_3)\wedge(x_1\vee x_2\vee\bar{x}_3)$.

Предпоследняя форма представления СФН — дизъюнктивная совершенная нормальная форма ФАЛ — ДСНФ, а последняя — конъюнктивная совершенная нормальная форма ФАЛ—КСНФ.

Помимо указанных общепринятых способов задания ФАЛ (С, Т, Ф) в теории надежности широко принят также графический способ отображения СФН — так называемая структурная схема надежности (ССН), которая представляет собой граф, чьи ветви (ребра) отображают элементы системы так, что при работоспособном состоянии элемента, отображающая его ветвь, принимается замкнутой (проводящей), в противном случае — разомкнутой (непроводящей). В ССН выделяются два граничных узла α, β, так что если между ними имеется хотя бы один замкнутый путь, то система полагается работоспособной, в противном случае — отказавшей. ССН может либо вытекать из СФН, либо выполнять роль первичной, исходной информации о надежностной структуре системы. В обоих случаях между СФН и ССН имеет место взаимооднозначное соответствие (поскольку всегда существует взаимооднозначное соответствие между ССН и СФН, представленных в форме ДСНФ или КСНФ, устанавливаемое с помощью табличного задания ФАЛ). Примеры подобных соответствий приведены в табл. 9.17, где ПС — последовательная ССН; ПР — параллельная ССН; ППН — пример последовательно-параллельной СФН с независимыми параллельными и последовательными подсхемами (две любые подсхемы ССН называются взаимонезависимыми, если они не имеют общих элементов, т. е. не имеют ветвей с одинаковыми индексами, в противном случае они называются зависимыми); ППЗ — примеры последовательно-параллельных ССН с зависимыми подсхемами; НПП — пример ССН непараллельно-последовательного типа.

Таблица 9.16

x_1	x_2	x_3	φ	x_1	x_2	x_3	φ
1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	0	1	0	1	0	1
1	0	1	1	0	0	1	0
0	1	1	1	0	0	0	0

Уточним теперь задачу расчета надежности системы с монотонной структурной функцией. Зная СНФ системы в любой форме и вероятности $p_i=p_i(t)$ (или $q_i=q_i(t)$) при заданном t ($i=1, 2, \ldots, n$), следует определить функцию работоспособности или отказа системы $P=P(t)$ или $Q=Q(t)$. Ниже приводятся два возможных метода решения данной задачи.

Метод ДСНФ. Первый шаг — СФН в заданной (произвольной) форме переводится в ДСНФ:

$$\varphi=\varphi(x_1, \bar{x}_1, \ldots, x_n, \bar{x}_n; \vee, \wedge)=$$
$$=\varphi_{\text{д}}(x_1, \bar{x}_1, \ldots, x_n, \bar{x}_n; \vee, \wedge).$$

Второй шаг — путем следующей замены символов в правой части последнего равенства: $\varphi\to p$; $x_i\to p_i$; $\bar{x}_i=1-p_i$; $i=\overline{1,n}$; $\vee\to+$, $\wedge\to\cdot$ определяется искомая функция работоспособности:

$$P=P(p_1, p_2, \ldots, p_n)=\varphi_{\text{д}}(p_1, 1-p_1, \ldots$$
$$\ldots, p_n, 1-p_n; +, \cdot),$$

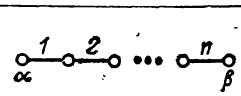
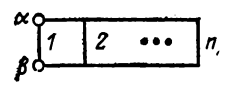
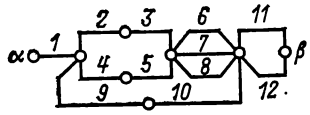
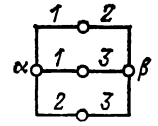
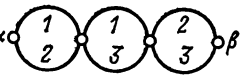
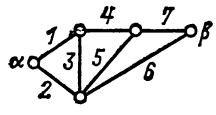
Например, для последовательной ССН (см. табл. 9.2) ДСНФ:

$$\varphi=\bigwedge_{i=1}^{n} x_i \to P=\prod_{i=1}^{n} p_i.$$

Метод КСНФ. Первый шаг — СФН в заданной (произвольной) форме переводится в КСНФ, преобразованную затем по правилу де Моргана в эквивалентную инверсную форму

$$\varphi=\varphi(x_1, \bar{x}_1, \ldots, x_n, \bar{x}_n; \vee, \wedge)=$$
$$=\varphi_k(\bar{x}_1, x_1, \ldots, \bar{x}_n, x_n; \wedge, \vee).$$

Таблица 9.17

ССН	СФН	Тип
	$\bigwedge_{i=1}^{n} x_i$	ПС
	$\bigvee_{i=1}^{n} x_i$	ПР
	$x_1 \wedge ((((x_2 \wedge x_3) \vee (x_4 \vee x_5)) \wedge (x_6 \vee x_7 \vee x_8)) \vee (x_9 \wedge \wedge x_{10})) \wedge (x_{11} \vee x_{12})$	ППН
	$(x_1 \wedge x_2) \vee (x_1 \wedge x_3) \vee (x_2 \wedge x_3)$	ППЗ
	$(x_1 \vee x_2) \wedge (x_1 \vee x_3) \wedge (x_2 \vee x_3)$	ППЗ
	—	НПП

Второй шаг — путем следующей замены символов в правой части последнего равенства: $\vee \to Q$, $\overline{x_i} \to q_i$, $x_i \to p_i$, $i=\overline{1,n}$; $\vee \to +$, $\wedge \to \cdot$ определяется искомая функция отказа

$$Q = Q(q_1, \ldots, q_n) = \overline{\varphi}_k(q_1, 1-q_1, \ldots \ldots, q_n, 1-q_n, \cdot, +).$$

Например, для параллельной ССН (см. табл. 9.2) КСНФ:

$$\varphi = \bigvee_{i=1}^{n} x_i \to \overline{\varphi} = \bigwedge_{i=1}^{n} \overline{x}_i \to Q = \prod_{i=1}^{n} q_i.$$

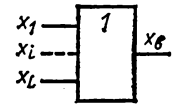
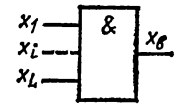
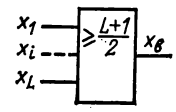
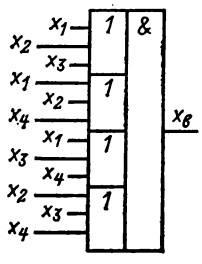
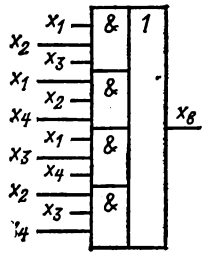
Таким образом, для последовательно-параллельных независимых ССН рассмотренные методы позволяют реализовать простое решение рассматриваемой задачи, которое сводится к поступательному свертыванию последовательных и параллельных подсхем по указанным формулам до тех пор, пока схема не приведется к одному элементу, заключенному граничными узлами α, β; при этом функции работоспособности и отказа этого элемента суть соответствующие функции рассчитываемой системы. Например для ССН типа ППН, приведенной в табл. 9.2, получаем: $p=p_1p_{17}p_{18}$, где $p_{17}=1-(1-p_{15})(1-p_{16})$; $p_{15}=p_9p_{10}$; $p_{16}=p_{13}p_{14}$; $p_{13}=1-(1-p_2p_3)(1-p_4p_5)$; $p_{14}=1-q_6q_7q_8$; $p_{18}=1-q_{11}q_{12}$.

Для систем с более сложной структурой данные методы подробно описаны в [9.7, 9.8].

Рассмотрим особенности расчета надежности систем на двоичных логических (ДЛ) элементах и на переключающих двухполюсных (ПД) элементах с учетом двух типов их отказов: отказы типа ложный нуль — Л0 (для ПД это отказы типа обрыв, ложное несрабатывание и т. п.) и отказы типа ложная единица — Л1 (для ПД это отказы типа короткое замыкание, ложное срабатывание и т. п.). Для указанных элементов функция отказа $q=q_0+q_1$, где $q_0=P\{\text{Л0}\}$, $q_1=P\{\text{Л1}\}$, при этом по-прежнему: $p+q=p+q_0+q_1=1$. Обозначим также $Q_0=P\{\text{Л0}\}$, $Q_1=P\{\text{Л1}\}$ — функции отказа типа Л0, Л1 системы в целом. В указанных обозначениях справедлив следующий алгоритм расчета. Функции Q_0, Q_1 определяются независимо друг от друга каждая по своей СФН; при этом применимы оба рассмотренные выше метода. В результате получаем $Q_0=Q_0(q_{01}, \ldots, q_{0n})$, $Q_1=Q_1(q_{11}, \ldots, q_{1n})$, где q_{0i}, q_{1i} — функции отказа Л0, Л1 i-го элемента системы. Затем определяется результирующая функция отказа системы $Q=Q_0+Q_1$, которая позволяет определить любые другие показатели ее надежности.

В качестве примера рассмотрим некоторые наиболее распространенные схемы резервирования двоичных логических устройств с учетом двух видов отказов. Функциональная схема резервирования приведена на рис. 9.5, где $K1, \ldots, KL$ — однотипные (с функциональной и надежностной точек зрения) устройства — каналы, выходные сигналы которых $x_1, \ldots, x_L$ —

Таблица 9.18

Схема ВО	Q_0	$\approx Q_0$	Q_1	$\approx Q_1$
	q_0^L		$1-(1-q_1)^L$	Lq_1
	$1-(1-q_0)^L$	Lq_0	q_1^L	—
	$\sum_{i=0,5(L+1)}^{L} C_L^i q_0^i (1-q_0)^{L-i}$	$C_L^{0,5(L+1)} q_0^{0,5(L+1)}$	$\sum_{i=0,5(L+1)}^{L} C_L^i q_1^i (1-q_1)^{L-i}$	$C_L^{0,5(L+1)} \times$ $\times q_1^{0,5(L+1)}$
	$4q_0^3-3q_0^4$	$4q_0^3$	$6q_1^2-8q_1^3+3q_1^4$	$6q_1^2$
	$6q_0^2+8q_0^3+3q_0^4$	$6q_0^2$	$4q_1^3-3q_1^4$	$4q_1^3$

двоичные переменные, $i=\overline{1,L}$; L — общее число каналов; BO — восстанавливающий орган; x_B — выходной (двоичный) сигнал ВО.

Функция ВО—$x_B=f_B(x_1, ..., x_L)$ — булева функция, удовлетворяющая следующим свойствам (вытекающим из назначения ВО и равноправности каналов): $f_B(0)=0$, $f_B(1)=1$, симметрии, монотонности. Функция f_B, удовлетворяющая перечисленным свойствам, называется восстанавливающей функцией — ВФ.

Определим показатели надежности рассматриваемой системы, введя следующие обозначения: q_0, q_1 — вероятности отказа типа Л0, Л1 одного любого канала; q_{B0}, q_{B1} — вероятности отказа типа Л0, Л1 восстанавливающего органа; Q_{B0i}, Q_{B1} — вероятности отказа типа Л0, Л1 системы в целом; Q_B — результирующая вероятность отказа системы в целом; Q_0, Q_1 — вероятности отказа системы Л0, Л1 при идеально надежном ВО. Запишем вначале соотношения, не зависящие от ВФ: $Q_B=Q_{B0}+Q_{B1}$; $Q_{B0}=1-(1-Q_0)(1-q_{B0})\approx Q_0+q_{B0}$; $Q_{B1}=1-(1-Q_1)(1-q_{B1})\approx Q_1+q_{B1}$. Соотношения $Q_0=Q_0(q_0, f_B(x_1, ..., x_L))$; $Q_1=Q_1(q_1, f_B(x_1, ..., x_L))$ для $f_B(x_1, ..., x_L)\in$ВФ сведены в табл. 9.18, где приближенные выражения соответствуют малым вероятностям отказов. Таким образом, при заданных $q_0(t)$, $q_1(t)$, $q_{B0}(t)$, $q_{B1}(t)$ приведенные соотношения позволяют определить любые показатели надежности рассматриваемой системы.

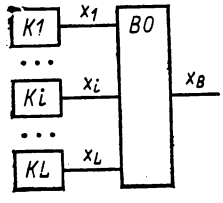


Рис. 9.5

В заключение данного раздела отметим следующее. При анализе практически любых систем (в частности, электрических цепей) широко применяются методы декомпозиции (диакоптики); сказанное в полной мере справедливо и для решения рассматриваемой задачи. Большинство практически встречающихся систем можно разбить на независимые подсистемы в общем случае и, как правило, различных типов (указанный процесс может быть и обычно бывает многоступенчатым). Применение к этим подсистемам наиболее адекватных им методов расчета (в том числе рассмотренные выше методы, как универсальные, так и частные) позволяет кардинально снизить трудоемкость расчета надежности сложных систем.

Расчет надежности резервированных изделий

Еще один класс изделий представляют резервированные системы. Рассмотрим изделие, состоящее из одного основного и резервных элементов (рис. 9.6). Резервные элементы могут находиться в одном из трех режимов: нагруженном, облегченном и ненагруженном. Будем считать, что время переключения резервного элемента на место отказавшего рабочего мало и им можно пренебречь, а сам переключатель — абсолютно надежным. Кроме того, считаем, что отказ обнаруживается мгновенно после возникновения. Основные характеристики надежности описанного изделия покажем на примере дублированной системы (рис. 9.7). На рис. 9.6 и 9.7 резервные элементы заштрихованы.

Рассмотрим сначала невосстанавливаемую дублированную систему, резервный элемент которой находится в облегченном режиме.. Вероятность отказа системы $Q(t)$

$$Q(t) = \int_0^t \left[1 - p_2^0(x)\, p_2(x,\ t)\right] d\left[1 - p_1(x)\right],$$

где $p_2^0(x)$ — ВБР второго элемента в облегченном режиме; $p_2(x,\ t)$ — условная вероятность того, что второй элемент не откажет, находясь в рабочем состоянии на интервале времени $(x,\ t)$ при условии, что он не отказал

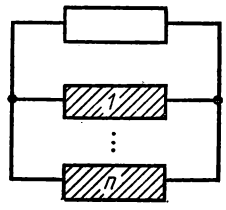


Рис. 9.6

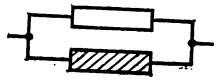


Рис. 9.7

на участке $(0,\ x)$, находясь в облегченном режиме.

Средняя наработка τ до отказа системы

$$\tau = \int_0^\infty t\, dQ(t) = \int_0^\infty [1 - Q(t)]\, dt.$$

В частном случае описанной системы, когда $p_1(x) = e^{-\lambda_1 x}$, $p_2(x) = e^{-\nu\lambda_2 x}$, где ν — коэффициент нагрузки второго элемента в облегченном режиме $(0 \leqslant \nu \ll 1)$, для ВБР $P(t) = 1 - Q(t)$ и среднего времени работы до отказа можно получить следующие выражения:

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2(1-\nu)} \times$$

$$\times\, e^{-\lambda_2 t}\left\{1 - e^{-[\lambda_1 - \lambda_2(1-\nu)]t}\right\};$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2(\lambda_1 + \nu\lambda_2)}.$$

При малых интенсивностях отказов λ_1 и λ_2 для $P(t)$ справедлива приближенная формула:

$$P_t \approx 1 - \lambda_1\lambda_2(1 + \nu)\, t^2.$$

Для восстанавливаемой дублированной системы обозначим: $\lambda_1^{(2)}(\lambda_2^{(1)})$ — интенсивность отказа первого (второго) элемента при условии, что второй (первый) уже отказал; $\mu_1^{(2)}(\mu_2^{(1)})$ — интенсивность восстановления первого (второго) элемента при условии, что второй (первый) уже восстанавливается.

Таблица 9.19

Показатель	Точное значение	Приближенное значение	Погрешность
$T_0^{(0)}$	$\dfrac{1 + c_1 d_1 + c_2 d_2}{c_1\lambda_1 + c_2\lambda_2}$	$\dfrac{\mu_1\mu_2}{\lambda_1\lambda_1^{(2)}\mu_1 + \lambda_1\lambda_2^{(1)}\mu_2}$	$\delta_+ \approx 3/2\bar{\lambda}$
τ_1	$\left(\mu_1^{(2)} + \mu_2^{(1)}\right)^{-1}$		
$T_0^{(1)}$	$\dfrac{\mu_1^{(2)} h_1 + \mu_2^{(1)} h_2}{\left(\mu_1^{(2)} + \mu_2^{(1)}\right)\left(c_1\lambda_1 + c_2\lambda_2\right)}$	$\dfrac{\mu_1\mu_2}{\lambda_2\lambda_1^{(2)}\mu_1 + \lambda_1\lambda_2^{(1)}\mu_2}$	$\delta_+ \approx 1/\bar{\lambda}$
K	$1 + \dfrac{c_1\lambda_1 + c_2\lambda_2}{\mu_1^{(2)} h_1 + \mu_2^{(1)} h_2}$	$\left[1 + \dfrac{\lambda_2\lambda_1^{(2)}\mu_1 + \lambda_1\lambda_2^{(1)}\mu_2}{\mu_1\mu_2\left(\mu_1^{(2)} + \mu_2^{(1)}\right)}\right]^{-1}$	$\delta_+ \approx 2\bar{\nu}^3$

В табл. 9.19 приводятся точные и приближенные формулы для основных характеристик надежности рассматриваемой системы. Здесь

$$c_1 = \lambda_2^{(1)}/\left(\lambda_2^{(1)} + \mu_1\right); \quad c_2 = \lambda_1^{(2)}/\left(\lambda_1^{(2)} + \mu_2\right);$$

$$d_1 = \lambda_1/\lambda_2^{(1)}, \quad d_2 = \lambda_2/\lambda_1^{(2)};$$

$$h_1 = (1 - c_2)(1 + c_1 d_1) + c_2 d_2 (1 + c_1\lambda_1/\lambda_2);$$

$$h_2 = (1 - c_1)(1 + c_2 d_2) + c_1 d_1 (1 + c_2\lambda_2/\lambda_1).$$

Приближенные формулы, приведенные в табл. 9.19, справедливы при выполнении условия

$$\bar{\gamma} = \bar{\lambda}/\mu \ll 1/2,$$

где $\bar{\lambda} = \max(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_1^{(2)}, \lambda_2^{(1)})$, $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_1^{(2)}, \mu_2^{(1)})$.

Расчет надежности изделий с зависимыми элементами

Предположение о независимости элементов изделий на практике в ряде случаев оказывается неверным. Такая зависимость может проявляться, например, если на все элементы одновременно оказывает влияние один и тот же внешний воздействующий фактор (температура, вибрация, радиация и т. п.).

При последовательном соединении n зависимых элементов имеют место следующие оценки:

$$P(t) \geqslant \prod_{i=1}^{n} P_i(t); \quad K \geqslant \prod_{i=1}^{n} k_i,$$

$$\tau_i \geqslant \int_0^\infty \prod_{i=1}^{n} P_i(t)\, dt.$$

Рассмотрим показатели надежности двухэлементной системы в случае, когда отказ одного элемента влияет на отказ другого, а отказ другого элемента не оказывает влияния на отказ первого. Элементы соединены последовательно или параллельно.

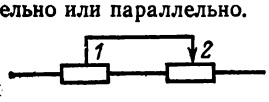


Рис. 9.8

В случае последовательного соединения (рис. 9.8) отказ первого элемента (*1*) влечет за собой отказ второго элемента (*2*), но отказ второго элемента не оказывает никакого влияния на отказ первого. Это означает, что при $T_1 < T_2$ элементы зависимы, а при $T_1 \geqslant T_2$ — независимы (T_i — случайный срок службы i-го элемента, $i = 1, 2$). Отказ системы происходит либо в результате отказа второго элемента, либо при отказе обоих элементов.

Показатели надежности последовательной и параллельной системы с зависимыми отказами приведены в табл. 9.20.

Рассмотрим теперь восстанавливаемую дублированную систему с нагруженным резервом. Зависимость между отказами проявляется в том, что в момент отказа первого элемента с вероятностью p_2 отказывает второй, а при отказе второго — с вероятностью p_1 отказывает первый. Восстановления считаются мгновенными. Система отказывает при одновременном

Таблица 9.20

Соединение	Показатель	Точное значение	Верхняя граница	Нижняя граница
Последовательное	Q	$Q_2 + qQ_1 \times (1 - Q_2)$	$Q_1 + Q_2 - Q_1Q_2$	Q_2
	T_0		T_2	$\min(T_1, T_2)$
Параллельное	Q	$Q_1Q_2 + qQ_1 \times (1 - Q_2)$	Q_1	Q_1Q_2
	T_0		$\max(T_1, T_2)$	T_1

отказе обоих элементов. Ниже приводятся некоторые показатели надежности описанной системы в случае, когда длительность безотказной работы элементов имеет экспоненциальное или эрланговское распределение (табл. 9.21).

В табл. 9.21 k_i — среднее число замен i-го элемента до первого отказа системы, $q_i = 1 - p_i$; $i, j = 1,2$, $i \neq j$.

Марковский метод расчета надежности систем

Широкий класс систем как с восстановлением, так и без восстановления может эффективно отображаться марковской моделью, в частности марковской системой с дискретным множеством состояний и непрерывным временем. Для этого достаточно, чтобы законы распределения наработки до отказа и времени восстановления были экспоненциальными (когда средние времена восстановления элементов достаточно малы по сравнению со средними временами их «жизни», то вид аппроксимации функций распределения времен восстановления элементов практически несуществен с точки зрения оценки основных показателей надежности системы; необходимо лишь сохранение правильных значений средних времен восстановления).

Графическим отображением марковской системы с дискретным множеством состояний и непрерывным временем может служить ее так называемый граф состояний, множество вершин (узлов) которого служит отображением всех возможных состояний системы, множество ветвей (ребер)—отображением интенсивностей всех возможных переходов между состояниями, причем направления переходов указываются стрелками — на рис. 9.9. $\mathbf{C} = \|0, 1, \ldots, n\|^{\mathrm{T}}$ — вектор состояний системы; $\Lambda = \|\lambda_{ik}\|_{N,N}$ — матрица интенсивностей переходов; элементы матрицы λ_{ik} — действительные неотрицательные

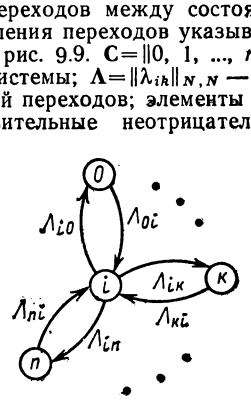


Рис. 9.9

Таблица 9.21

Показатель	Экспоненциальное распределение	Эрланговское распределение	Эрланговское распределение (частный случай)
$F(t)$	$F_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}$	$F_i(t) = 1 - \sum_{i=0}^{n_i-1} e^{-\lambda_i t}(\lambda_i t)^{2/21}$	$F_1(t) = F_2(t),\ p_1 = p_2$
$P_0(t)$	$e^{-(\lambda_1 p_2 + \lambda_2 p_1)t}$	$\frac{\frac{1-n_1}{q_1^{n_2}}\ \frac{1-n_1}{q_2^{n_1}}}{\lambda_1\left(1-q_2^{1/n_1}\right)+\lambda_2\left(1-q^{1/n_2}\right)}$	$\frac{2}{q^{n}}(1-n)\ e^{-2\lambda}$
T_0	$1/(\lambda_1 p_2 + \lambda_2 p_1)$	$\frac{\frac{1-n_2}{q_1^{n_2}}\ \frac{1-n_1}{q_2^{n_1}}}{\lambda_1\left(1-q_2^{1/n_1}\right)+\lambda_2\left(1-q_1^{1/n_2}\right)}$	$\frac{\frac{2}{q^{n}}(1-n)}{2\lambda\left(1-q^{1/n}\right)}$
k_i	$\frac{\lambda_i + \lambda_j p_i}{\lambda_1 p_2 + \lambda_2 p_1}$	—	$\frac{p+1}{2p}$

числа; $N=n+1$ — общее число состояний системы; $\pi(t) = \|\pi_0(t),\ \pi_1(t), ...,\ \pi_n(t)\|^{\mathrm{T}}$ — вектор вероятностей $\pi_i(t)$ — вероятностей пребывания системы в i-м состоянии в момент времени t. Отметим, что поскольку события, отображаемые вероятностями $\pi_i(t)$, образуют полную группу, то $\sum_{i=1}^{n} \pi_i(t) = 1$ — условие нормировки.

Вектор $\pi(t)$ необходим и достаточен, чтобы определить любые показатели надежности системы (см. «Показатели надежности восстанавливаемых объектов»); следовательно, исходная задача анализа рассматриваемой системы сводится к определению вектора при заданных матрице $\mathbf{\Lambda}$ и векторе начальных условий $\pi(0) = \pi_0 = \|\pi_0(0),\ \pi_1(0), ...,\ \pi_n(0)\|^{\mathrm{T}} = \|\pi_{00},\ \pi_{10}, ...,\ \pi_{n0}\|^{\mathrm{T}}$.

Указанная задача решается с помощью уравнения Колмогорова:

$$d\pi(t)/dt = \alpha\pi(t)$$

при заданных начальных условиях $\pi(0) = \pi_0$, где

$$\alpha = \|\alpha_{ik}\|_{N,N};\ \alpha_{ik} = \begin{cases} -\sum_{l=0}^{n} \lambda_{il}, & i = k \\ \lambda_{ki}, & i \neq k \end{cases}$$

— матрица Колмогорова.

Учитывая условие нормировки, можно записать укороченное уравнение Колмогорова

$$d\pi(t)/dt = \mathbf{a}\pi(t) + b,$$

где

$$\mathbf{a} = \|a_{ik}\|_{n,n};$$

$$a_{ik} = \begin{cases} -\lambda_{0i} - \sum_{l=0}^{n} \lambda_{il}, & i = k \\ -\lambda_{0i} - \lambda_{ki}, & i \neq k \end{cases}$$

— укороченная матрица Колмогорова; $\mathbf{b} = \|\lambda_{01}, ..., \lambda_{0n}\|^{\mathrm{T}}$.

Вектор финальных вероятностей, характеризующий стационарный режим системы $\pi_\infty = \|\pi_{1\infty}, ..., \pi_{n\infty}\|^{\mathrm{T}}$; $\pi_{i\infty} = \lim_{t\to\infty} \pi_i(t)$, $i = 1, n$, определяется укороченным уравнением Колмогорова $\mathbf{a}\pi_\infty = -\mathbf{b}$.

Уравнение Колмогорова — система дифференциальных обыкновенных линейных уравнений, записанная в форме уравнения состояния. Численное решение подобной системы, а также системы уравнений стационарного режима реализуется современным стандартным программным обеспечением ЭВМ. Однако во многих практических задачах целесообразно использовать точные или приближенные (в том числе машинно-реализуемые) решения в символьной форме, основанные, в частности, на преобразовании Лапласа уравнения Колмогорова (достоинства символьных решений известны).

Преобразование Лапласа укороченного уравнения Колмогорова можно записать в следующей форме:

$$\mathbf{A}(s)\,\pi(s) = s^{-1}\,\mathbf{R}(s);$$

$$\pi(s) = \|\pi_1(s),\ \ldots,\ \pi_n(s)\|^{\mathrm{T}},$$

где

$$\mathbf{A}(s) = \|A_{ik}(s)\|_{n,n};$$

$$A_{ik} = \begin{cases} s + \lambda_{0i} + \sum_{l=0}^{n} \lambda_{il}, & i = k; \\ -\lambda_{ki} + \lambda_{0i}, & i \neq k; \end{cases}$$

$$\mathbf{R}(s) = \|r_1(s),\ \ldots,\ r_n(s)\|^{\mathrm{T}};$$

$$r_i(s) = \lambda_{0i} + s1.$$

$$\widetilde{\pi}_i(s) = \mathbf{L}\,]\pi_i(t)] = \int_0^\infty \exp(-st)\,\pi_i(t)\,dt$$

— преобразование Лапласа вероятности $\pi_i(t)$.

Матричная форма решения относительно $\widetilde{\pi}(s)$

$$\widetilde{\pi}(s) = s^{-1}\,\mathbf{A}^{-1}(s)\,\mathbf{R}(s).$$

В скалярной форме

$$\widetilde{\pi}_k(s) = s^{-1} B_k(s)/D(s),\quad k=\overline{1,\ n},$$

где

$$D(s) = \det \mathbf{A}(s) = \sum_{\nu=0}^{\delta} d_\nu s^\nu,\quad \delta = n$$

— характеристический полином;

$$B_k(s) = \det \mathbf{A}_k(s) = \sum_{\mu=0}^{\beta_k} b_i s^\mu,\quad \beta_k \leqslant n,$$

где $\mathbf{A}_k(s)$ — матрица, получаемая из $\mathbf{A}(s)$ путем замены ее k-го столбца столбцом $\mathbf{R}(s)$.

В дальнейшем, когда это не будет приводить к неясности индекс k в последних выражениях будем опускать, записывая преобразование Лапласа вероятности пребывания системы в некотором состоянии в момент времени t в следующем виде:

$$\pi(s) = s^{-1}B(s)/D(s);\quad B(s) = \sum_{\mu=0}^{\beta} d_\mu s^\mu;$$

$$D(s) = \sum_{\nu=0}^{\delta} d_\nu s^\nu,\quad \beta \leqslant \delta = n.$$

Одной из наиболее информативных характеристик надежности системы является функция распределения наработки до отказа T — времени попадания системы из любого начального состояния в ее поглощающие состояния — функция отказа системы $Q(t)$.

Если какая-либо $\pi(t)$ — вероятность пребывания системы в поглощающем состоянии (любое k-е состояние называется поглощающим, когда $\forall i \in (\overline{1,\ n}) : \lambda_{ki}=0$; все поглощающие вершины графа можно объединить в одну), то

$$\widetilde{Q}(s) = \widetilde{\pi}(s) = s^{-1}\,\widetilde{\varphi}(s) = P(T<t),$$

где

$$\widetilde{\varphi}(s) = B(s)/D(s)$$

— преобразование Лапласа плотности распределения T. Функция $\widetilde{\varphi}(s)$ обладает следующими свойствами:

$$\lim_{s\to\infty} \widetilde{\varphi}(s) = 0;\quad \lim_{s\to 0} \widetilde{\varphi}(s) = 1,$$

откуда следует $\alpha=\delta-\beta\geqslant 1$, $d_0=b_0$.

Ниже приводится несколько приближенных аналитических методов оценки функции $Q(t)$ на основании преобразования Лапласа (минуя непосредственное обратное преобразование), справедливых для любого числа состояний системы $N=n+1$.

Приближенная оценка вероятности пребывания системы в заданном состоянии в момент времени t (в частном случае функции отказа t) представлена отрезком ряда Маклорена путем разложения ее преобразования Лапласа в ряд Лорана. Разлагая $\widetilde{\varphi}(s)$ в ряд Лорана [в силу указанных свойств $\widetilde{\varphi}(s)$ ряд сходится] и переходя почленно к оригиналу (поскольку ряд сходящийся), получаем следующее выражение для функции отказа, являющееся ее рядом Маклорена:

$$Q(t) = \sum_{i=\alpha}^{\infty} \frac{l_i}{i!}\, t^i,$$

где коэффициент ряда Лорана l_i определяется следующими рекуррентными соотношениями:

$$l_\alpha = d_\delta^{-1} b_\beta;$$

$$l_{\alpha+1} = d_\delta^{-1}(b_{\beta-1} - l_\alpha d_{\delta-1});$$

$$l_{\alpha+2} = d_\delta^{-1}(b_{\beta-2} - l_\alpha d_{\delta-2} - l_{\alpha+1} d_{\delta-1});$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$l_{\alpha+k} = d_\delta^{-1}\left(b_{\beta-k} - \sum_{i=\alpha}^{\alpha+k-1} l_i\, d_{\delta-\alpha-k+i}\right).$$

Для оценки малых вероятностей (т. е. при анализе высоконадежных систем) достаточно ограничиться r-членным отрезком ряда

$$Q(t) = Q_r(t) = \sum_{i=\alpha}^{\alpha+r+1} \frac{l_i}{i!}\, t^i,$$

где обычно $r\leqslant 2{,}3$ независимо от $N=n+1$.

Пример 6. Пусть преобразование Лапласа функции отказа $\widetilde{Q}(s)=s^{-1}(6+s)/(6+11s+6s^2+s^3)$, следовательно, $d_0=b_0=6$, $d_1=11$, $d_2=6$, $b_1=d_1=1$, $\delta=3$, $\beta=1$, $\alpha=2$. При этом получаем следующие коэффициенты ряда Лорана:

$$l_1=0;\ l_2 = d_3^{-1} b_1 = 1;\ l_3 = d_3^{-1}(b_0 - l_2 d_2) = 0;$$

$$l_4 = d_3^{-1}(l_2 d_1 + l_3 d_2) = -11;$$

$$l_5 = -d_3^{-1}(l_2 d_0 + l_3 d_1 + l_4 d_2) = 60\ \dots$$

В результате при $r=4$: $Q(t)=0{,}5t^2-0{,}46t^4-0{,}5t^5$. Точное решение $Q(t)=1-2{,}5\exp(-t)+2\exp(-2t)-0{,}5\exp(-3t)$.

Сравнение точного и приближенных решений приведено на рис. 9.10. При $Q<0{,}1$ ошибка одночленного отрезка ряда составляет примерно 15 %, двух- и трехчленного —1,5 %, четырехчленного +0,4 %; при $Q<0{,}01$ ошибка одночленного ряда составляет 1 %.

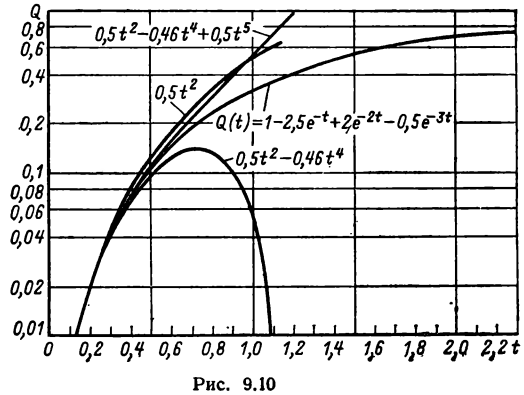


Рис. 9.10

Поскольку требуемая точность оценки вероятности отказа обычно не превышает 10—20 % (хотя бы в силу низкой точности исходных данных), то в данном случае достаточна оценка $Q(t) \approx 0{,}5t^2$. Таким образом, рассмотренная методика может быть весьма эффективной при оценке малых вероятностей отказа, т. е. при анализе высоконадежных систем независимо от их сложности.

Метод моментов. Функция распределения наработки до отказа, как и любая функция распределения, может с любой конечной точностью отображаться конечным числом ее моментов. В рассматриваемом случае необходимое число моментов обычно не превышает четырех.

Начальный момент случайной величины T k-го порядка можно определить непосредственно по преобразованию Лапласа плотности распределения T—$\widetilde{\varphi}(s)$, минуя обратное преобразование Лапласа на основании следующего соотношения:

$$\alpha_k = \int_0^\infty t^k \varphi(x)\, dx = (-1)^k \lim_{s \to 0} d^k \widetilde{\varphi}(s)/ds^k.$$

В результате имеют место следующие выражения для первых четырех начальных моментов:

$$\alpha_1 = \tau = \delta_1 - \beta_1;$$

$$\alpha_2 = 2\left(\delta_1^2 - \delta_1\beta_1 - \delta_2 - \beta_2\right);$$

$$\alpha_3 = 6\left(-\beta_3 + \delta_3 + \beta_1\delta_2 - \delta_1\beta_2 + 2\delta_1\delta_2 + \delta_1^2(\delta_1 - \beta_2)\right);$$

$$\alpha_4 = 24\left(\beta_4 - \delta_4 - \delta_1(\beta_3 - \delta_3) + \delta_2(\beta_2 - \delta_2) + \delta_1(\delta_1(\beta_2 - \delta_2) + 2\delta_2(\beta_1 - \delta_1) - \delta_1^3(\beta_1 - \delta_1)\right),$$

где $\beta_i = b_i/d_0$; $\delta_i = d_i/d_0$.

Далее определяются соответствующие центральные моменты:

$$\mu_k = M[(t_k - \alpha_1)^k];$$

$$\mu_1 = 0,\ \mu_2 = \sigma^2 = \alpha_2 - \alpha_1^2 = \alpha_2 - \tau^2;$$

$$\mu_3 = \alpha_3 - 3\alpha_2\alpha_1 + 2\alpha_1^3;$$

$$\mu_4 = \alpha_4 - 4\alpha_3\alpha_1 + 6\alpha_2\alpha_1^2 - 3\alpha_1^2.$$

После этого можно определить коэффициент формы кривой распределения — ее асимметрию $As = \mu_3/\sigma^3$ и эксцесс $Ex = (\mu_4/\sigma_4) - 3$.

Полученные данные позволяют подобрать, как правило, достаточно эффективную аппроксимацию распределения наработки системы до отказа, используя, в частности, методику, изложенную в [9.12]: вначале по асимметрии и эксцессу определяется тип функции искомой аппроксимации [9.12], после чего определяются параметры выбранной функции.

Если распределение наработки до отказа не очень сильно отличается от нормального, то функцию этого распределения можно аппроксимировать рядом Шарлье

$$Q(t) = F_0(x) - \frac{1}{6}\,\mathrm{As}\,\frac{d^2\varphi_0(x)}{dx^2} + \frac{1}{24}\,\mathrm{Ex}\,\frac{d^3\varphi_0(x)}{dx^3},$$

где $F_0(x)$, $\varphi_0(x)$ — нормированные функция и плотность нормального распределения; $x = (t - \tau)/\sigma$.

В ряде случаев характер функции $Q(t)$ позволяет достаточно эффективно использовать аппроксимацию задержанной экспонентой

$$Q_a(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau_3; \\ 1 - \exp\left[-(t - \tau_3)/\sigma_a\right], & t \geqslant \tau_3. \end{cases}$$

Данный метод достаточно эффективен, когда корни характеристического уравнения $D(s) = 0$, пронумерованные в порядке их возрастания, удовлетворяют условию $s_1^{-2} \gg \sum_{i=2}^{n} s_i^{-2}$.

Иначе говоря, функция $Q(t)$ содержит одну доминирующую медленно затухающую экспоненту по сравнению с остальным практически неограниченным множеством быстро затухающих экспонент, формирующих квазизадержку. Можно показать, что сказанное имеет место, когда коэффициенты характеристического полинома $D(s)$ удовлетворяют условию $d_1^2 \gg 4d_0d_2$.

При этом постоянная времени доминирующей экспоненты оценивается соотношением $\tau_1 = s_1^{-1} \approx d_1/d_0$.

Выбор коэффициентов аппроксимации σ_a, τ_3 осуществляется исходя из равенства первых двух моментов (первого начального τ и второго центрального σ) функций $Q(t)$ и $Q_a(t)$. При этом получаем

$$\sigma_a = \sigma = \left[\delta_1^2 - \beta_1^2 - 2(\delta_2 - \beta_2)\right]^{0,5};$$

$$\tau_3 = \tau - \sigma = \tau_a - \sigma_a = \delta_1 - \beta_1 - \sigma.$$

Пример. Система электропитания содержит два в общем случае разнотипных источника. Когда работоспособны оба источника, нагрузка между ними распределяется примерно поровну и при этом интенсивности их отказов равны соответственно $\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ ч$^{-1}$, $\lambda_2 = 10^{-3}$ ч$^{-1}$. При отказе одного (любого) из источников источник, сохраняющий работоспособность, принимает на себя полную нагрузку и при этом его интенсивность отказов возрастает втрое. Ремонтопригодность источников характеризуется интенсивностями восстановления, равными соответственно $\mu_1 = 0{,}1$ч$^{-1}$, $\mu_2 = 0{,}2$ч$^{-1}$. Отказ обоих источников означает отказ систем. Время эксплуатации системы $t_э = 1$ год (8760 ч); к началу эксплуатации оба источника работоспособны. Определить показатели надежности системы, включая наработку до первого отказа t_γ при гарантийной вероятности $\gamma = 95$ % (согласно разделу «Показатели надежности восстанавливаемых объектов», а также сравнить среднюю наработку до отказа данной системы с аналогичной величиной для той же системы, но потерявшей ремонтопригодность.

Решение. Составление графа системы (рис. 9.11, *а*) и преобразования Лапласа укороченного уравнения Колмогорова:

$$\begin{Vmatrix} s + \mu_1 + 3\lambda_2 + \lambda_1 & \lambda_1 & \lambda_1 - \mu_2 \\ \lambda_2 & s + \mu_2 + 3\lambda_1 + \lambda_2 & \lambda_2 - \mu_1 \\ -3\lambda_2 & -3\lambda_1 & s + \mu_1 + \mu_2 \end{Vmatrix} \times \begin{Vmatrix} \widetilde{\pi}_1(s) \\ \widetilde{\pi}_2(x) \\ \widetilde{\pi}_3(s) \end{Vmatrix} = \frac{1}{s} \begin{Vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ 0 \end{Vmatrix}.$$

Определение $\widetilde{\pi}_i(s)$, $i = \overline{1,3}$. Согласно исходным данным все интенсивности восстановления существенно превышают интенсивности отказов (так назы-

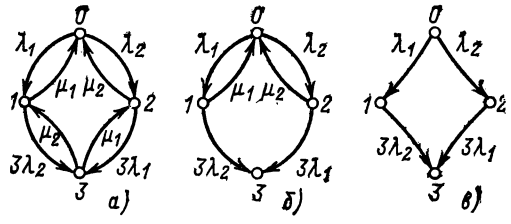


Рис. 9.11

ваемый случай «сильного» восстановления); при этом

$$\widetilde{\pi}_1(s) = s^{-1}(\lambda_1\mu_2(\mu_1+\mu_2) + \lambda_1(\mu_1+2\mu_2)s+s^2)/D(s);$$

$$\widetilde{\pi}_2(s) = s^{-1}(\lambda_2\mu_1(\mu_1+\mu_2) + \lambda_2(\mu_2+2\mu_1)s + s^2)/D(s);$$

$$\widetilde{\pi}_3(s) = s^{-1}(3\lambda_1\lambda_2(\mu_1+\mu_2)+6(\lambda_1\lambda_2 s))/D(s);$$

$$D(s) = \mu_1\mu_2(\mu_1+\mu_2) + \mu_1\mu_2 s + 2(\mu_1+\mu_2)s^2 + s^3.$$

Согласно $D(s)$ постоянная времени доминирующей экспоненты не превышает $(\mu_1+\mu_2)^{-1} \approx 34$; при этом время переходного процесса в системе не превышает 0,1 % времени эксплуатации. Следовательно, далее, за исключением расчета закона распределения наработки до отказа, можно полагать режим работы системы стационарным и исходить из финальных вероятностей состояния системы: $\pi_1(\infty) = \lambda_1\mu_1 = 2\cdot10^{-2}$, $\pi_2(\infty) = \lambda_2/\mu_2 = 0{,}5\cdot10^{-2}$, $\pi_3(\infty) = 3\lambda_1\lambda_2/\mu_1\mu_2 = 3\cdot10^{-4}$.

Стационарный параметр потока отказов системы

$$\omega(\infty) = \sum_{i\in \text{РС}} \sum_{k=\text{ОС}} \Lambda_{ik}\pi_i(\infty) =$$

$$= 3\lambda_2\pi_1(\infty) + 3\lambda_1\pi_2(\infty) = 9\cdot10^{-5}\ \text{ч}^{-1}.$$

Среднее число отказов за время эксплуатации

$$\Omega = \int_0^{t_э} \omega(x)\,dx \approx \omega(\infty)\,t_э = 0{,}788.$$

Коэффициент простоя системы и суммарное среднее время простоя за время эксплуатации $КП = \pi_3(\infty) = 3\cdot10^{-4}$, $t_п = КП\,t_э = 2{,}63$ ч.

Средняя наработка системы на отказ $\tau_{н.о} = (t_э - t_п)/\Omega = 1{,}11\cdot10^4$.

Суммарное среднее время, затраченное на ремонт первого и второго источников за время эксплуатации, $t_{p1} = [\pi_1(\infty)+\pi_3(\infty)]t_э \approx 178$ ч, $t_{p2} = (\pi_2(\infty)+\pi_3(\infty))t_э = 46{,}4$ ч.

Суммарное среднее время, затраченное на параллельный ремонт обоих источников, $t_{p12} = \pi_3(\infty)t_э = 2{,}63$ ч.

Суммарное среднее время, затраченное на ремонт системы,

$$t_{p\Sigma} = (\pi_1(\infty) + \pi_2(\infty) + \pi_3(\infty))\,t_э = 222\ \text{ч}.$$

Составление графа системы с квазипоглощающим отказовым состоянием (рис. 9.11, *б*) и соответствующего преобразования Лапласа укороченного уравнения Колмогорова (с учетом «сильного» восстановления):

$$\begin{Vmatrix} s+3\mu_1 & \lambda_1 & \lambda_1 \\ \lambda_2 & s+3\mu_2 & \lambda_2 \\ -3\lambda_2 & -3\lambda_1 & s \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \widetilde{\pi}_1(s) \\ \widetilde{\pi}_2(s) \\ \widetilde{\pi}_3(s) \end{Vmatrix} = \frac{1}{s} \begin{Vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ 0 \end{Vmatrix}.$$

Определение преобразования Лапласа функции распределения системы до первого отказа

$$\widetilde{Q}(s) = \widetilde{\pi}_3(s) = s^{-1}\sum_{i=0}^{1} b_i s^i \Big/ \sum_{i=0}^{3} d_i s^i,$$

где $b_0 = d_0 = 3\lambda_1\lambda_2(\mu_1+\mu_2) = 1{,}8\cdot10^{-6}\text{ч}^{-3}$; $b_1 = 6\lambda_1\lambda_2 = 1{,}2\cdot10^{-5}\text{ч}^{-2}$; $d_1 = \mu_1\mu_2 = 2\cdot10^{-2}\text{ч}^{-2}$; $d_2 = \mu_1+\mu_2 = 0{,}34\ \text{ч}^{-1}$, $d_3 = 1$.

Поскольку выполняется условие $d_1^2 = 4\cdot10^{-4} \gg 4d_0d_2 \approx 2\cdot10^{-6}$, то целесообразно аппроксимировать функцию $Q(t)$ задержанной экспонентой, с этой целью определяются $\tau = \tau_a = \delta_1 - \beta_1 = 11\,104$ ч, $\sigma = \sigma_a = -(\delta_1^2 - \beta_1^2 - 2(\delta_2-\beta_2))^{0,5} = 11\,096$ ч, $\tau_з = \tau - \sigma = 8$ ч.

В результате получаем $Q_a(t) = 0$ при $t < 8$ ч, $Q_a(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t-8}{11\,104}\right)$ при $t > 8$. Если $Q_a < 0{,}1$, то $Q_a(t) \approx (t-8)/1\cdot1\cdot10^4$.

Определение гарантийной наработки: $t_\gamma = 8 + (1 - -0{,}01\gamma)11\,104 = 560$ ч.

Составление для системы без восстановления графа (рис. 9.11, *в*) и преобразования Лапласа укороченного уравнения Колмогорова:

$$\begin{Vmatrix} s+3\mu_2 & \lambda_1 & \lambda_1 \\ \lambda_2 & s+3\lambda_1 & \lambda_2 \\ -3\lambda_2 & -3\lambda_1 & s \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \widetilde{\pi}_1(s) \\ \widetilde{\pi}_2(s) \\ \widetilde{\pi}_3(s) \end{Vmatrix} = \frac{1}{s} \begin{Vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ 0 \end{Vmatrix}.$$

Определение преобразования Лапласа функции распределения наработки до отказа

$$Q(s) = \widetilde{\pi}_3(s) = s^{-1}\sum_{i=0}^{1} b_i s^i \Big/ \sum_{i=0}^{3} d_i s^i,$$

где $b_0 = d_0 = 6\lambda_1\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2) = 3{,}6\cdot10^{-8}\text{ч}^{-3}$; $b_1 = 6\lambda_1\lambda_2 = 1{,}2\cdot10^{-5}\text{ч}^{-2}$; $d_1 = 16\lambda_1\lambda_2 = 32\cdot10^{-6}\ \text{ч}^{-2}$; $d_2 = 3(\lambda_1+\lambda_2) = 9\cdot10^{-3}\text{ч}^{-1}$, $d_3 = 1$.

Определение средней наработки до отказа: $\tau = \delta_1 - \beta_1 = 560$ ч.

Таким образом, благодаря восстановлению средняя наработка возрастает в 11 100/560 ≈ 20 раз.

Рассмотренный пример иллюстрирует уже высказанное положение, что практически любые показатели надежности марковской системы достаточно просто определяются вектором ее состояния.

Наиболее полная сводка результатов расчета типовых систем с резервированием и восстановлением на основе марковской модели приведена в [9.10].

Во многих случаях для расчета систем с неэкспоненциальными законами распределения наработки до отказа и времени восстановления можно построить приближенную марковскую модель на основе так называемого метода фиктивных состояний [9.14]; здесь же рассмотрен ряд других эффективных модификаций марковских систем.

Практически все ограничения на характер законов распределения элементов снимаются при расчете методом статистического моделирования — методом Монте-Карло (МНК), что, однако, достигается ценой часто непреодолимого увеличения объема вычисления. Существенно более эффективные алгоритмы реализуются путем рационального сочетания МНК с численно-аналитическими методами и диакоптикой.

Список литературы

9.1. ГОСТ 27.002-83. Надежность в технике. Термины и определения.

9.2. ГОСТ 27.503-81. Методы оценки показателей надежности.

9.3. ГОСТ 22.959-78. Система технического обслуживания и ремонта техники.

9.4. ГОСТ 27.503-75. Надежность в технике. Система сбора и отработки информации. Методы оценки показателей надежности.

9.5. **Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д.** Математические методы в теории надежности. М., 1965.

9.6. **Вопросы** математической теории надежности/Под ред. Б. В. Гнеденко. М.: Радио и связь, 1983. 386 с.

9.7. **Райншке К.** Модели надежности и чувствительности систем. М., 1979.

9.8. **Рябинин И. Н.** Логико-вероятностные методы расчета надежности систем. М., 1982.

9.9. **Диллон Б., Сингх Ч.** Инженерные методы обеспечения надежности систем. М., 1984.

9.10. **Козлов Б., Ушаков И.** Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М., 1975.

9.11. **Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И.** Таблицы для анализа и контроля надежности. М., 1968.

9.12. **Хан Г., Шапиро С.** Статистические модели в инженерных задачах. М., 1968.

9.13. **Рипс Я. А., Савельев Б. А.** Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами. М.: Энергия, 1974. 248 с.

9.14. **Расчет** надежности ядерных энергетических установок. Марковская модель. М., 1982.

9.15. **Рипс Я. А.** Надежность электроприводов. — В кн.: Справочник по автоматизированному электроприводу. М.: Энергоатомиздат, 1983, с. 367—398.

9.16. **Барлоу Ф., Прашан Р.** Математическая теория надежности. М., 1969.

Раздел 10

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

СОДЕРЖАНИЕ

10.1. Виды, комплектность и стадии разработки конструкторских документов . . 292

10.2. Общие требования к оформлению чертежей и схем 295
Форматы и основные надписи (295). Линии на чертежах и схемах (295). Шрифты чертежные (297). Изображения на чертежах, масштабы (297). Графические обозначения материалов в сечениях (298). Нанесение размеров и предельных отклонений (ГОСТ 2.307-68) (298). Нанесение размеров и предельных отклонений (ГОСТ 2.307-68) (298).

10.3. Оформление чертежей электротехнических изделий 299 299
Основные требования к чертежам (299). Чертежи для электромонтажа (300). Чертежи жгутов, кабелей и проводов (302). Чертежи изделий с электрическими обмотками и магнитопроводами (302). Изображение печатных плат (303).

10.4. Оформление схем 304
Классификация схем (304) Общие правила выполнения схем (304). Правила выполнения структурных и функциональных схем (305). Правила выполнения принципиальных схем (306). Правила выполнения схем соединений и подключения (307). Правила выполнения схем общих и расположения (308). Правила выполнения электрических схем обмоток и изделий с обмотками (по ГОСТ 2.705-70) (308). Правила выполнения схем цифровой вычислительной техники (по ГОСТ 2.708-81) (309). Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах (по ГОСТ 2.710-81) (311).

10.5. Условные графические обозначения, применяемые в схемах 312
Обозначения общего применения (по ГОСТ 2.721-74) (312). Электрические машины (по ГОСТ 2.722-68) (312). Катушки индуктивности, реакторы, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители (по ГОСТ 2.723-68) (315). Токосъемники (по ГОСТ 2.726-68) (316). Разрядники. Предохранители (по ГОСТ 2.727-68) (317). Резисторы. Конденсаторы (по ГОСТ 2.728-74) (317). Электроизмерительные приборы (по ГОСТ 2.729-68) (319). Полупроводниковые приборы (по ГОСТ 2.730-73) (320). Источники света (по ГОСТ 2.732-68) (322). Химические источники тока (по ГОСТ 2.742-68) (323). Элементы цифровой техники (по ГОСТ 2.743-82) (324). Электронагреватели, устройства и установки электротермические (по ГОСТ 2.745-68) (328). Род тока и напряжения, виды соединения обмоток, формы импульсов (по ГОСТ 2.750-68) (330). Линии электрической связи, провода, кабели и шины (по ГОСТ 2.751-73) (330). Коммутационные устройства и контактные соединения (по ГОСТ 2.755-74) (331). Воспринимающая часть электромеханических устройств (по ГОСТ 2.756-76) (335). Элементы аналоговой техники (по ГОСТ 2.759-82) (336).

10.6. Правила выполнения диаграмм . . 337

10.7. Перечень ГОСТ и СТ СЭВ по оформлению конструкторских документов . . 338

10.1. ВИДЫ, КОМПЛЕКТНОСТЬ И СТАДИИ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКТОРСКИХ ДОКУМЕНТОВ

Конструкторская документация определяет устройство и состав изделия, содержит необходимые данные для его изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

Изделием называется любой предмет или набор предметов, предназначенный для выполнения определенных служебных функций и подлежащий изготовлению на предприятии.

Устанавливают следующие виды изделий:

а) *деталь* — изготавливается из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций;

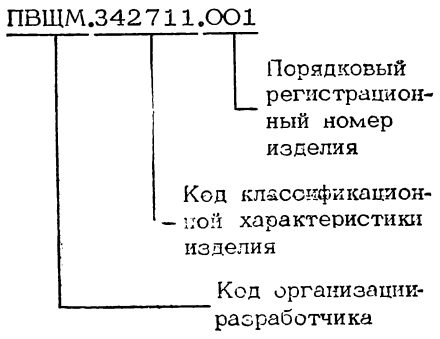
б) *сборочная единица* — изготавливается на предприятии-изготовителе с применением сборочных операций;

в) *комплекс* — несколько изделий, не соединенных сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций;

г) *комплект* — набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера.

По ГОСТ 2.201-80 каждому изделию должно быть присвоено обозначение, которое включает в себя четырехзначный код организации-разработчика, шестизначный код классификационной характеристики изделия и трехзначный порядковый регистрационный номер изделия.

Пример обозначения изделия:



Конструкторские документы подразделяются на графические (чертежи и схемы) и текстовые (спецификации, ведомости, пояснительные записки, инструкции, технические условия и т. п.). Каждый конструкторский документ в соответствии с ГОСТ 2.102-68 имеет шифр. Исключение составляют чертеж детали и спецификация, которые не имеют шифра.

Чертежи в зависимости от содержания бывают следующих видов:

а) чертеж детали содержит изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля;

б) сборочный чертеж (СБ) содержит изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для ее сборки (изготовления) и контроля;

в) чертеж общего вида (ВО) определяет конструкцию изделия, взаимодействие его составных частей и поясняет принцип работы изделия;

г) теоретический чертеж (ТЧ) определяет геометрическую форму (обводы) изделия и координаты расположения составных частей;

д) габаритный чертеж (ГЧ) содержит контурное изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами;

е) элекромонтажный чертеж (МЭ) содержит данные, необходимые для выполнения электрического монтажа изделия;

ж) монтажный чертеж (МЧ) содержит контурное изображение изделия, а также данные, необходимые для его установки на месте применения;

з) упаковочный чертеж (УЧ) содержит данные, необходимые для его упаковки.

На схемах в виде условных изображений и обозначений показывают составные части изделия и связи между ними.

В зависимости от входящих в изделие элементов схемы разделяются на виды: электрические, гидравлические, пневматические, вакуумные, газовые, автоматизации, комбинированные. В зависимости от назначения различают следующие типы схем: структурные, функциональные, принципиальные, соединений, подключения, расположения. Шифр схемы регламентирует ГОСТ 2.701-76. Более подробно о схемах изложено в § 10.4.

Текстовые документы подразделяются на документы, содержащие текст, разбитый на графы (спецификация, ведомость и т. п.), и документы, содержащие в основном сплошной текст (пояснительная записка, технические условия, инструкция и т. п.).

Пояснительная записка (ПЗ) содержит описание устройства и принципа действия изделия, а также обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений. Технические условия (ТУ) содержат требования (совокупность всех показателей, норм, правил и положений) к изделию, его изготовлению, контролю, приемке и поставке.

Устройство и состав изделия определяется несколькими конструкторскими документами, которые составляют комплект конструкторских документов. В комплекте выделяют основной конструкторский документ. Для детали за основной конструкторский документ принимают чертеж детали; для сборочных единиц, комплексов и комплектов — спецификацию.

Основной конструкторский документ имеет обозначение по ГОСТ 2.201-80, которое совпадает с обозначением изделия. Обозначение других конструкторских документов состоит из обозначения изделия и шифра документа, установленного ГОСТ 2.102-68 и ГОСТ 2.701-76, например: ПВЩМ.342711.001СБ.

Основной комплект конструкторских документов изделия объединяет документы, относящиеся ко всему изделию в целом, например, чертеж общего вида, сборочный чертеж, спецификация, принципиальная электрическая схема и т. д. Конструкторские документы составных частей в основной комплект документов изделия не входят.

Полный комплект конструкторских документов (в общем случае) состоит из следующих документов: основного комплекта конструкторских документов на данное изделие; основных конструкторских документов на все составные части данного изделия.

Конструкторская документация разрабатывается на нескольких стадиях (ГОСТ 2.103-68): техническое предложение; эскизный проект; технический проект; рабочая конструкторская документация.

Техническое предложение (ГОСТ 2.118-73) — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации изделия на основании анализа технического задания заказчика и различных вариантов возможных решений изделия, сравнительной оценки решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого изделия и патентные исследования. Техническое предложение содержит следующие документы: чертеж общего вида, схемы, таблицы, расчеты и др. Обязательными для технического предложения являются пояснительная записка и ведомость технического предложения.

Эскизный проект (ГОСТ 2.119-73) — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габаритные размеры разрабатываемого изделия. В эскизный проект обязательно включаются: пояснительная запис-

Таблица 10.1. **Номенклатура конструкторских документов (ГОСТ 2.102-68)**

Шифр документа	Наименование документа	Техническое предложение	Эскизный проект	Технический проект	Рабочая документация			
					Деталь	Сборочная единица	Комплекс	Комплект
—	Чертеж детали			○[1]	●[1]			
СБ	Сборочный чертеж					●[2]		
ВО	Чертеж общего вида	○	○	●				
ТЧ	Теоретический чертеж		○	○	○	○	○	
ГЧ	Габаритный чертеж	○	○	○[1]	○[1]	○[2]	○	
МЭ	Электромонтажный чертеж					○		
МЧ	Монтажный чертеж					○[2]	○	○
УЧ	Упаковочный чертеж				○	○	○	○
По ГОСТ 2.701-76	Схемы	○	○	○		○	○	○
—	Спецификация					●	●	●
ПТ	Ведомость технического предложения	●						
ЭП	Ведомость эскизного проекта		●					
ТП	Ведомость технического проекта			●				
ПЗ	Пояснительная записка	●[3]	●[3]	●[3]				
ТУ	Технические условия			○	○	○	○	○
ТБ	Таблицы	○	○	○	○	○	○	○
РР	Расчеты	○[3]	○[3]	○[3]	○	○	○	○
И	Инструкции				○	○	○	○

ка, ведомость эскизного проекта. Кроме того, могут быть включены: чертеж общего вида, теоретический и габаритный чертежи, схемы и другие документы.

Технический проект (ГОСТ 2.120-73) — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия и исходные данные для разработки рабочей документации. В технический проект обязательно включаются: чертеж общего вида, пояснительная записка, ведомость технического проекта. Могут быть также включены чертежи деталей, теоретический и габаритный чертежи, схемы и т. д.

Рабочая конструкторская документация (ГОСТ 2.109-73) — совокупность конструкторских документов, которые предназначены для: изготовления и испытания опытного образца (опытной партии) изделия, изготовления и испытания установочной серии. Рабочая документация на деталь обязательно содержит чертеж детали, а также могут быть чертежи: теоретический, габаритный, упаковочный; технические условия и другие документы. Рабочая документация на сборочную единицу обязательно содержит спецификацию и сборочный чертеж; могут быть также другие чертежи, схемы и текстовые документы.

Номенклатура конструкторских документов на разных стадиях разработок приведена в табл. 10.1.

Обозначения: ● — документ обязательный; ○ — документ составляют в зависимости от характера, назначения или условий производства изделия; 1, 2, 3 — документы могут быть совмещены.

10.2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЧЕРТЕЖЕЙ И СХЕМ

Форматы и основные надписи

Конструкторские документы выполняются на листах определенных размеров, которые носят название форматов (ГОСТ 2.301-68). Форматы листов определяются размерами внешней рамки листа (рис. 10.1). Форматы разделяют на основные и дополнительные.

За основные форматы приняты:

Формат	Размеры сторон
А0	841×1189 мм
А1	594×841 мм
А2	420×594 мм
А3	297×420 мм
А4	210×297 мм

Дополнительные форматы образуются увеличением размеров коротких сторон основных форматов, кратно простым числам. Обозначение производного формата составляется из обозначения основного формата и его кратности, например А0×2 (1189×1682), А4×8 (297×1682) и т. д. Допускается применять формат А5 с размерами сторон 148×210 мм.

Все конструкторские документы сопровождаются основной надписью и дополнительными графами к ней. Расположение основной надписи и дополнительных граф на форматах, а также размеры рамок показаны на рис. 10.1. Графы, выполненные штриховой линией, вводят по необходимости.

Основные надписи располагают в правом нижнем углу конструкторских документов. На листах формата А4 основные надписи располагают вдоль короткой стороны листа.

Для быстрого нахождения на чертеже (схеме) составной части изделия или его элемента рекомендуется разбивать поле чертежа (схемы) на зоны.

Основные надписи, дополнительные графы и рамки выполняют сплошными основными и сплошными тонкими линиями. Содержание и размеры основных надписей, обозначенных на рис. 10.1 римской цифрой I, приведены на рис. 10.2.

В графах основной надписи (ГОСТ 2.104-68) и дополнительных графах (номера граф на рис. 10.2 даны в скобках) указывают:

1 — наименование изделия в соответствии с ГОСТ 2.109-73, а также наименование документа, если этому документу присвоен шифр (допускается для сборочного чертежа наименование документа не указывать);

2 — обозначение документа;

3 — обозначение материала детали (графу заполняют только на чертежах деталей);

4 — литеру (по ГОСТ 2.103-68);

5 — массу изделия по ГОСТ 2.109-73;

6 — масштаб (в соответствии с ГОСТ 2.302-68 и ГОСТ 2.109-73);

7 — порядковый номер листа (на документах, состоящих из одного листа, графу не заполняют);

8 — общее количество листов документа;

9 — наименование или различительный индекс предприятия, выпускающего документ;

10, 11, 12 — характер работы, фамилии и подписи лиц, разработавших документ;

13 — дата подписи документа;

14—18 — таблица изменений в соответствии с ГОСТ 2.503-74;

II, III (см. рис. 10.1) — инвентарные номера подлинников и дубликатов, а также подписи и дата приемки, обозначение документов в соответствии с ГОСТ 2.501-68, ГОСТ 2.502-68, ГОСТ 2.503-74;

IV — обозначение документа (графа является обязательной для чертежей и схем).

Линии на чертежах и схемах

Любые чертежи и схемы представляют собой совокупность отрезков прямых и кривых линий определенного начертания. По ГОСТ 2.303-68 установлено девять типов линий, начертание которых показано на рис. 10.3.

Толщина сплошной основной линии *s* должна быть в пределах от 0,5 до 1,4 мм в зависимости от размеров и сложности изображения, а также от формата чертежа. Наименьшая толщина линии чертежа, выполненного в карандаше, 0,3 мм.

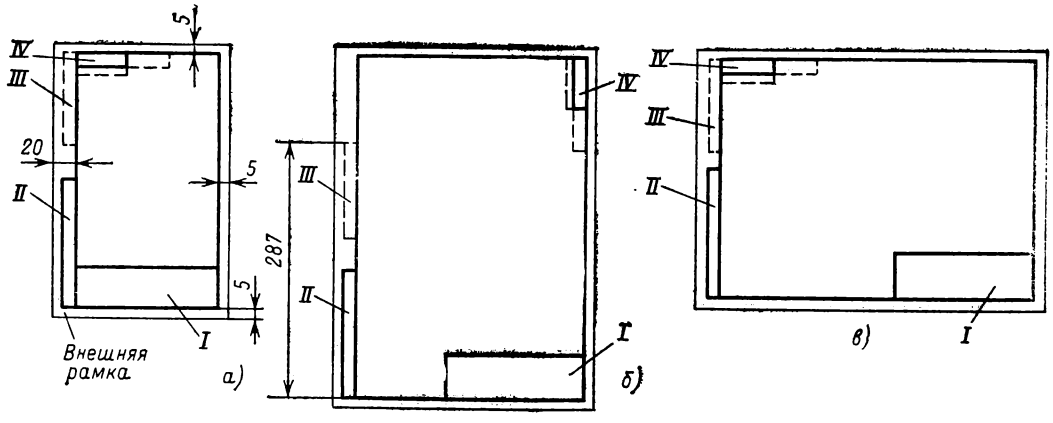


Рис. 10.1. Расположение основной надписи и дополнительных граф на стандартных форматах:

а — формат А4; *б* — форматы больше А4 при расположении основной надписи вдоль короткой стороны листа; *в* — формат больше А4 при расположении основной надписи вдоль длинной стороны листа; *I* — основная надпись; *II, III, IV* — дополнительные графы

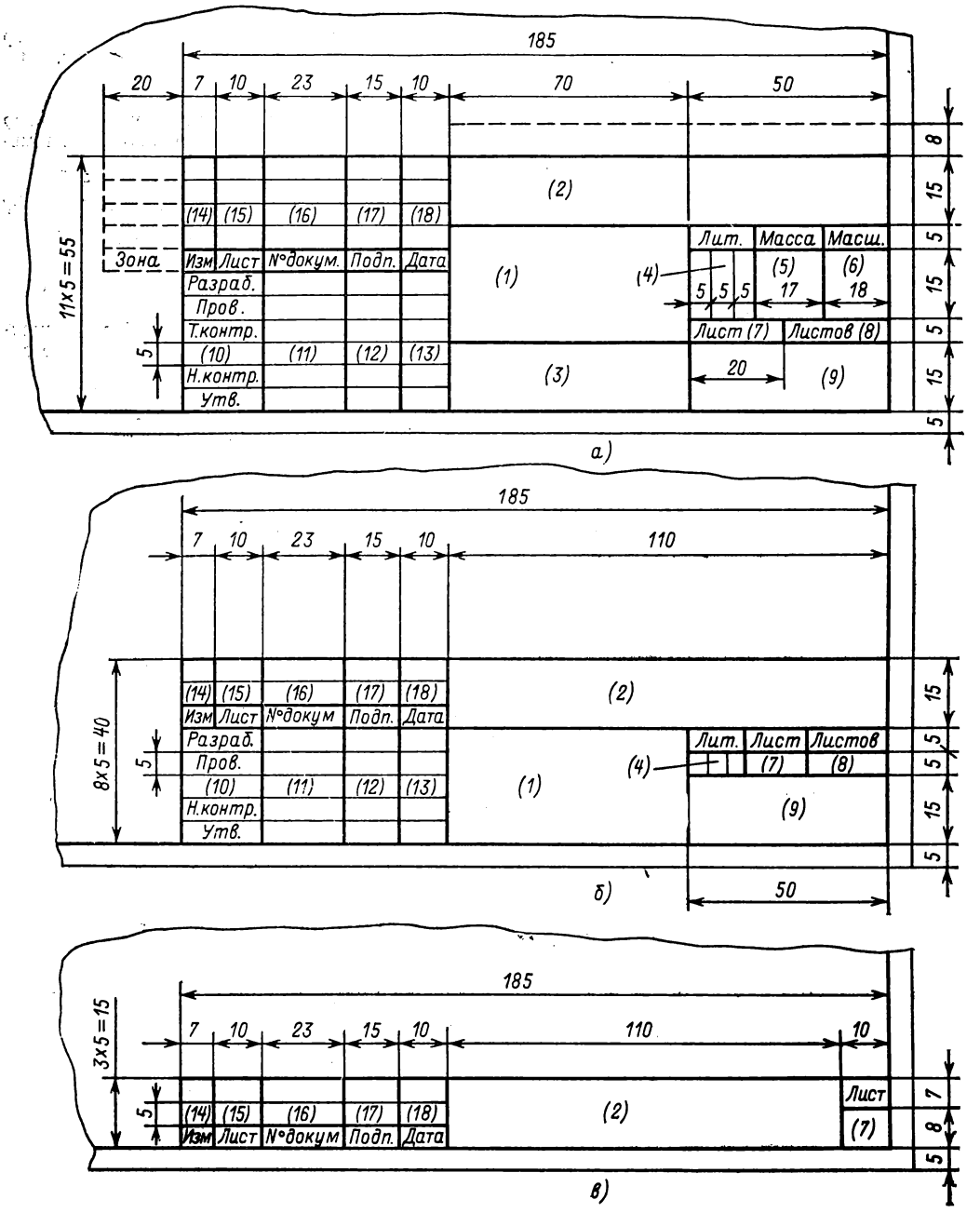


Рис. 10.2. Основная надпись:

а — для чертежей и схем; *б* — для текстовых документов; *в* — для последующих листов чертежей, схем и текстовых документов

Длину штрихов в штриховых линиях следует выбирать в зависимости от величины изображения. Штрихпунктирные линии должны пересекаться и заканчиваться штрихами.

Для построения видимого изображения используется сплошная толстая основная линия. Тонкая сплошная линия используется для выполнения размерных и выносных линий, штриховки, подчеркивания надписей и т. д. Сплошная волнистая линия применяется для обрыва изображения и разграничения вида и разреза. Невидимый контур изображения и невидимые линии перехода выполняются штриховой линией. Оси и центровые линии проводятся штрихпунктирной тонкой линией. Если диаметр окружности менее 12 мм, в качестве центровой применяется сплошная тонкая линия.

Назначение других типов линий представлено в ГОСТ 2.303-68.

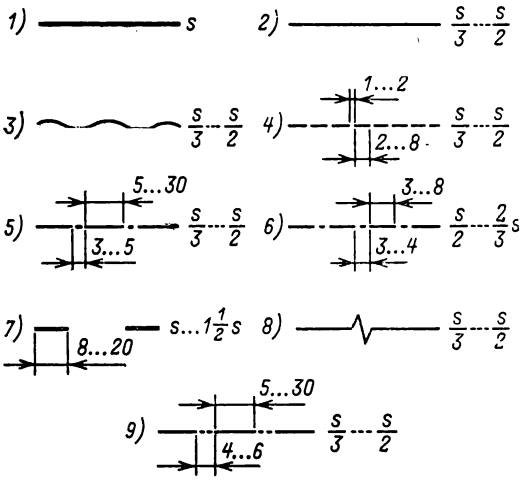


Рис. 10.3. Начертание линий по ГОСТ 2.303-68:
1 — сплошная толстая основная; *2* — сплошная тонкая; *3* — сплошная волнистая; *4* — штриховая; *5* — штрихпунктирная; *6* — штрихпунктирная утолщенная; *7* — разомкнутая; *8* — сплошная тонкая с изломами; *9* — штрихпунктирная с двумя точками

Шрифты чертежные

Все надписи на чертежах и схемах выполняются чертежным шрифтом по ГОСТ 2.304-81.

Установлены следующие типы шрифта:

а) тип А без наклона; б) тип А с наклоном 75°; в) тип Б без наклона; г) тип Б с наклоном 75°.

Написание букв русского алфавита (кириллицы) шрифтом типа Б с наклоном, а также арабских и римских цифр приведено на рис. 10.4.

Допускаются два варианта написания цифры 3 (рис. 10.4). Римские цифры допускается ограничивать горизонтальными линиями (рис. 10.4).

Рекомендуются следующие размеры шрифтов: 2,5; 3,5; 5; 7; 10; 14; 20; 28; 40. Размер шрифта h — величина, определяемая высотой прописных букв в миллиметрах. Высота строчных букв (без отростков) примерно соответствует высоте прописных букв ближайшего меньшего размера шрифта.

Изображения на чертежах, масштабы

Изображение предметов (изделий, сооружений и их составных элементов) на чертежах представляет собой образную графическую информацию о геометрических свойствах предметов. Изображение должно содержать требуемые сведения о геометрической форме предмета и взаимном расположении его составных частей.

Изображения предметов должны выполняться по методу прямоугольного проецирования. При этом предмет предполагается расположенным между наблюдателем и соответствующей плоскостью проекций. За основные плоскости проекций принимают шесть граней куба, которые совмещают в одной плоскости. Изображение на фронтальной плоскости проекций принимается на чертеже в качестве главного. Предмет располагают относительно фронтальной плоскости проекций так, чтобы изображение на ней давало наиболее полное представление о форме и размерах предмета.

Рис. 10.4. Написание букв русского алфавита, арабских и римских цифр шрифтом типа Б с наклоном

Изображения на чертеже в зависимости от их содержания разделяют на виды, разрезы, сечения.

Вид — изображение обращенной к наблюдателю видимой части поверхности предмета. Для уменьшения количества изображений допускается на видах показывать необходимые невидимые части предмета при помощи штриховых линий.

Разрез — изображение предмета, мысленно рассеченного одной или несколькими плоскостями, при этом мысленное рассечение предмета относится только к данному разрезу и не влечет за собой изменения других изображений этого предмета. На разрезе показывается то, что получается в секущей плоскости и что расположено за ней. Допускается изображать не все, что расположено за секущей плоскостью, если этого не требуется для понимания конструкции предмета.

Для уменьшения количества изображений на чертеже допускается соединять часть вида и часть соответствующего разреза, разделяя их сплошной волнистой линией. Если при этом соединяется половина вида и половина разреза, каждый из которых является симметричной фигурой, то разделяющей линией служит ось симметрии. Если виды не находятся в непосредственной проекционной связи с главным

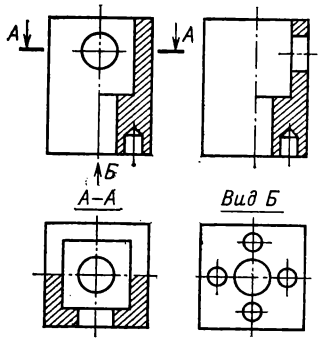


Рис. 10.5. Виды и разрезы

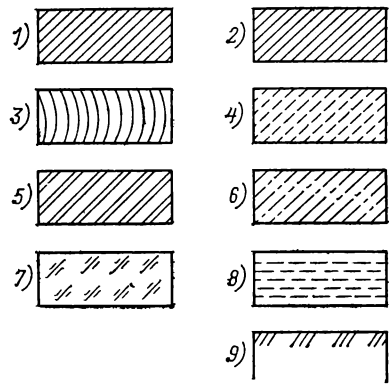


Рис. 10.6. Графические обозначения материалов:

1 — металл; *2* — неметаллические материалы; *3* — дерево; *4* — камень естественный; *5* — керамика и силикатные материалы для кладки; *6* — бетон; *7* — светопрозрачные материалы; *8* — жидкости; *9* — грунт естественный

изображением (видом или разрезом), то они должны быть отмечены на чертеже надписью по типу «Вид Б». Направление взгляда должно быть указано стрелкой (рис. 10.5).

Сечение — изображение фигуры, получающейся при мысленном рассечении предмета одной или несколькими плоскостями. На сечении показывается только то, что получается непосредственно в секущей плоскости.

Количество изображений на чертеже должно быть наименьшим, но обеспечивающим полное представление о предмете при применении установленных в соответствующих стандартах условных обозначений, знаков и надписей.

Для получения наглядных изображений на чертежах применяют аксонометрические проекции (ГОСТ 2.317-69).

Все изображения на чертежах выполняются в определенном масштабе.

Масштаб — отношение какого-либо размера изображения на чертеже к аналогичному размеру предмета. Стандартом ГОСТ 2.302-68 установлены следующие масштабы на чертежах:

Масштабы уменьшения: 1 : 2; 1 : 2,5; 1 : 4; 1 : 5; 1 : 10; 1 : 15; 1 : 20; 1 : 25; 1 : 40; 1 : 50; 1 : 75; 1 : 100; 1 : 200; 1 : 400; 1 : 500; 1 : 800; 1 : 1000.

Натуральная величина 1 : 1.

Масштабы увеличения: 2 : 1; 2,5 : 1; 4 : 1; 5 : 1; 10 : 1; 20 : 1; 40 : 1; 50 : 1; 100 : 1.

При проектировании генеральных планов крупных объектов допускается применять масштабы 1 : 2000; 1 : 5000; 1 : 10 000; 1 : 20 000; 1 : 25 000; 1 : 50 000. В необходимых случаях допускается применять масштабы увеличения (100n) : 1, где n — целое число.

Масштаб, указанный в предназначенной для этого графе основной надписи чертежа, должен обозначаться по типу 1 : 1; 1 : 2; 2 : 1 и т. д., а во всех остальных случаях — по типу М1 : 1; М1 : 2; М2 : 1 и т. д.

Графические обозначения материалов в сечениях

Графические обозначения материалов в сечениях в зависимости от вида материалов должны соответствовать приведенным на рис. 10.6 (ГОСТ 2.306-68). Наклонные параллельные линии штриховки должны проводиться под углом 45° к линии контура изображения или к его оси, или к линиям рамки чертежа. Если линии штриховки, проводимые к линиям рамки чертежа под углом 45°, совпадают по направлению с линиями контура или осевыми линиями, то вместо угла 45° следует брать угол 30 или 60°. Для смежных сечений двух деталей следует брать наклон линий штриховки для одного сечения вправо, для другого — влево (встречная штриховка). При штриховке «в клетку» для смежных сечений двух деталей расстояние между линиями штриховки в каждом сечении должно быть разным.

В смежных сечениях со штриховкой одинакового наклона и направления следует изменять расстояние между линиями штриховки или сдвигать эти линии в одном сечении по отношению к другому, не изменяя угла их наклона.

Нанесение размеров и предельных отклонений (ГОСТ 2.307-68)

Основанием для определения размеров изображенного изделия и его элементов служат размерные числа, нанесенные на чертеже.

Основанием для определения требуемой точности изделия при изготовлении являются указанные на чертеже предельные отклонения размеров, а также предельные отклонения формы и расположения поверхностей.

Общее количество размеров на чертеже должно быть минимальным, но достаточным для изготовления и контроля изделия. Справочные размеры (не подлежащие выполнению по данному чертежу) отмечают знаком *, а в технических требованиях записывают «* Размеры для справок».

Линейные размеры и предельные отклонения линейных размеров на чертежах указывают в миллиметрах без обозначения единицы величины.

Размеры на чертежах указывают размерными числами и размерными линиями. Размерную линию ограничивают стрелками, упирающимися в контурные или выносные линии. Элементы стрелок размерных линий выбирают

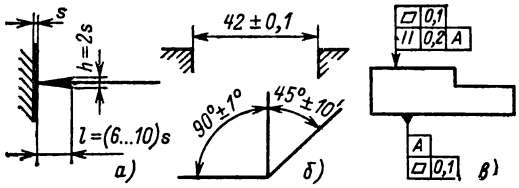


Рис. 10.7. Нанесение размеров и предельных отклонений:

а — размерная стрелка; *б* — нанесение размерных чисел и предельных отклонений; *в* — нанесение допусков формы и расположения поверхностей

ся в зависимости от толщины линий видимого контура и вычерчиваются приблизительно одинаковыми на всем чертеже. Форма стрелки и примерное соотношение ее элементов показано на рис. 10.7, *а*. Размерные линии предпочтительно наносить вне контура изображения. Выносные линии должны выходить за концы стрелок размерной линии на 1—5 мм. Размерные числа наносят над размерной линией возможно ближе к ее середине (рис. 10.7, *б*). Способ нанесения размерного числа при различных положениях размерной линии на чертеже определяется наибольшим удобством чтения.

Для всех размеров на рабочих чертежах указывают предельные отклонения, которые наносят непосредственно после номинальных размеров. Предельные отклонения линейных размеров на чертежах указывают условными обозначениями полей допусков и посадок согласно стандартам на допуски и посадки, например: 18H7 (по СТ СЭВ 144-75, 145-75 и 177-75), $12X_3$ (система допусков и посадок ОСТ), или числовыми величинами, например $12^{-0,02}_{-0,07}$, а также условными обозначениями предельных отклонений с указанием справа в скобках их числовых величин, например $12X_3\left(^{-0,02}_{-0,07}\right)$.

Допуски формы и расположения поверхностей указывают на чертеже условными обозначениями в соответствии с ГОСТ 2.308-79.

При условном обозначении данные о допусках формы и расположения поверхностей указывают в прямоугольной рамке, разделенной на две и более части, в которых помещают: в первой — знак допуска, во второй — числовое значение допуска в миллиметрах, в третьей — буквенное обозначение базы или буквенное обозначение поверхности, с которой связан допуск расположения (рис. 10.7, *в*).

Рамки выполняют сплошными тонкими линиями. Высота цифр, букв и знаков, вписываемых в рамки, должна быть равна размеру шрифта размерных чисел. Высота рамки — удвоенному размеру шрифта.

Рамку соединяют с элементом, к которому относится допуск, сплошной тонкой линией (прямой или ломаной), заканчивающейся стрелкой. Направление стрелки соответствует направлению измерения отклонения.

Базы обозначают зачерненным треугольником, который соединяют с рамкой. Треугольник должен быть равносторонним с высотой, приблизительно равной размеру шрифта размерных чисел.

Допуски формы	
Допуск прямолинейности	—
Допуск плоскостности	▱
Допуск круглости	○
Допуск цилиндричности	⌭
Допуск профиля продольного сечения	⌓
Допуски расположения	
Допуск параллельности	//
Допуск перпендикулярности	⊥
Допуск наклона	∠
Допуск соосности	◎
Допуск симметричности	⌯
Позиционный допуск	⌖
Допуск пересечения осей	×
Суммарные допуски формы и расположения	
Допуск радиального биения Допуск торцового биения Допуск биения в заданном направлении	↗
Допуск полного радиального биения Допуск полного торцового биения	⌰
Допуск формы заданного профиля	⌒
Допуск формы заданной поверхности	⌓

10.3. ОФОРМЛЕНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Основные требования к чертежам

Чертеж общего вида разрабатывают для эскизного или технического проекта (ГОСТ 2.119-73), и в общем случае он должен содержать: а) изображение изделия, текстовую часть и надписи, необходимые для понимания конструктивного устройства изделия, взаимодействия его составных частей и принципа работы изделия; б) размеры и другие наносимые на изделие данные; в) схему, если оформлять ее отдельным документом нецелесообразно; г) технические характеристики изделия.

Наименования и обозначения составных частей изделия на чертеже общего вида указывают: а) на полках линий-выносок; б) в таблице, размещаемой на том же листе, что и изображение изделия; в таблице, выполненной на отдельных листах формата А4 в качестве последующих листов чертежа общего вида. Таблица в общем случае состоит из граф: «Поз.», «Обозначение», «Кол.», «Дополнительные указания».

Элементы чертежа общего вида выполняют по правилам для рабочих чертежей (ГОСТ 2.109-73).

Чертеж детали рабочей документации должен содержать изображение детали, построенное методом прямоугольного проецирования, с необходимыми разрезами и сечениями. На изображение детали наносят размеры с предельными отклонениями и обозначение шероховатости поверхности. Приводят сведения о покрытии поверхности. В основной надписи указывается наименование материала, из которого изготовлена деталь, его марка и номер стандарта.

Сборочный чертеж (ГОСТ 2.109-73) должен содержать: а) изображение сборочной единицы, обеспечивающее возможность сборки и контроля сборочной единицы; б) размеры, предельные отклонения и другие параметры; в) указания о характере сопряжения и методах его осуществления, а также указания о выполнении неразъемных соединений; г) номера позиций составных частей, входящих в изделие; д) габаритные, установочные, присоединительные и другие необходимые справочные размеры; е) техническую характеристику и координаты центра масс (при необходимости).

Сборочные чертежи следует выполнять, как правило, с упрощениями, соответствующими требованиям стандартов ЕСКД (ГОСТ 2.109-73). Количество сборочных чертежей должно быть минимальным, но достаточным для рациональной организации производства.

Спецификация не входит в состав сборочного чертежа. Спецификация является самостоятельным конструкторским документом, определяющим состав сборочной единицы, комплекса или комплекта, и необходима для изготовления, комплектования конструкторских документов и планирования запуска в производство указанных изделий.

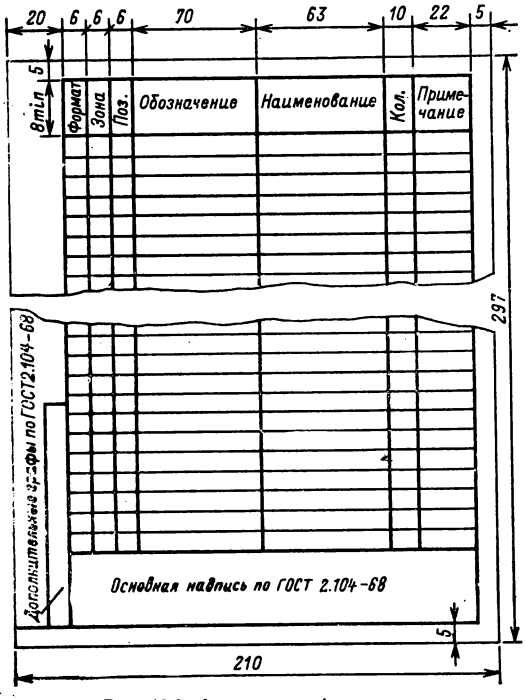


Рис. 10.8. Форма спецификации

Спецификация в общем случае состоит из разделов, которые располагают в следующей последовательности: документация, комплексы, сборочные единицы, детали, стандартные изделия, прочие изделия, материалы, комплекты.

Спецификацию составляют на отдельных листах на каждую сборочную единицу, комплекс, комплект по форме рис. 10.8.

Чертежи для электромонтажа

Электромонтажный чертеж (шифр МЭ) — графический конструкторский документ, содержащий данные, необходимые для выполнения электрического монтажа изделия. Электромонтажный чертеж должен быть связан со сборочным чертежом, по которому производится механическая сборка изделия одним из четырех способов:

А. Механическую сборку и электромонтаж изделия производят по одному чертежу. При этом разрабатывают сборочный чертеж для механической сборки согласно ГОСТ 2.109-73, учитывая требования ГОСТ 2.413-72, и спецификацию согласно ГОСТ 2.108-68, учитывая требования ГОСТ 2.413-72.

Б. Электромонтаж изделия производят по самостоятельному чертежу. При этом разрабатывают четыре конструкторских документа: сборочный чертеж для механической сборки (шифр СБ) и спецификацию к нему; сборочный чертеж для электромонтажа (шифр СБ) и спецификацию к нему.

В. Электромонтаж изделия производят по электромонтажному чертежу. При этом разрабатывают три конструкторских документа: сборочный чертеж для механической сборки (шифр СБ) и спецификацию к нему; электромонтажный чертеж (шифр МЭ). Составные части, устанавливаемые по электромонтажному чертежу, вносят в спецификацию сборочного чертежа в дополнительные разделы.

Г. Электромонтаж изделия производят по другим документам. При этом разрабатывают сборочный чертеж для механической сборки согласно ГОСТ 2.109-73 со спецификацией; в технических требованиях чертежа приводят ссылку на документ, которым следует руководствоваться при электромонтаже.

Правила выполнения чертежей для электромонтажа. Чертеж для электромонтажа выполняют в том же масштабе, что и чертеж для механической сборки. Допускается применять аксонометрические проекции.

На чертеже для электромонтажа изображают: составные части, устанавливаемые при электромонтаже, и места присоединения проводников — сплошными основными линиями; составные части, устанавливаемые до электромонтажа («обстановку»), — упрощенно и сплошными тонкими линиями.

Если составная часть является элементом электрической принципиальной схемы, то на ее изображении или около него наносят позиционное обозначение, присвоенное этому элементу в схеме (рис. 10.9). Элементам, не указанным в электрической принципиальной схеме или схеме соединений (переходным стойкам, лепесткам заземления и т. п.), для указания

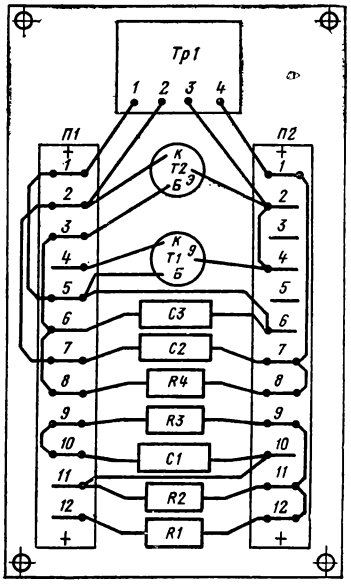


Рис. 10.9. Обозначение элементов на чертеже для электромонтажа

адресов присоединения проводников присваивают очередные позиционные обозначения после элементов того же функционального назначения, изображенных на схеме.

Допускается смещать изображения составных частей. При этом от смещенного изображения проводят линию — выноску, на полке которой наносят надпись «Смещено». Допускается условно изменять очертания составных частей, если их изображения закрывают друг друга (рис. 10.10). При этом искажения очертаний не должны нарушать ясность чертежа.

Проводник (провод, кабель, жгут, шину) изображают в соответствии с требованиями ГОСТ 2.414-75. При условном изображении проводников допускается слияние линий, изображающих одиночные провода или группу одиночных проводов, с другими линиями, изображающими одиночные провода и группы проводов. Не допускается слияние линий, изображающих жгут или кабель, с другими линиями. Условные изображения проводников, их изгибы в местах разветвления и слияния должны соответствовать ГОСТ 2.751-73.

Указания о присоединении к многоконтактному изделию можно приводить непосредственно на чертеже (рис. 10.11) или помещать в таблице (рис. 10.12). Электрическое соединение, осуществляемое пайкой или сваркой, изображают точкой диаметром от 1,5 до 3s, где s — толщина сплошной основной линии, принятая на чертеже.

Все проводники должны иметь обозначения, присвоенные им на электрической схеме соединений или электрической принципиальной схеме. При отсутствии обозначений в этих схемах проводникам присваивают самостоятельные обозначения. Допускается не присваивать обозначения перемычкам и одиночным проводам, изображения которых отчетливо просматриваются на чертеже.

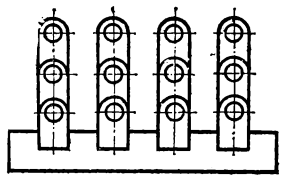


Рис. 10.10. Условное изображение составных частей изделия

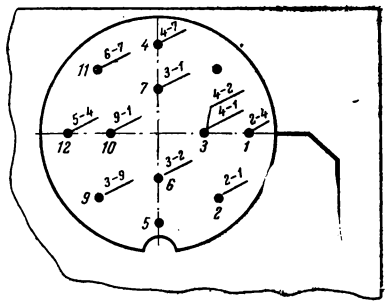
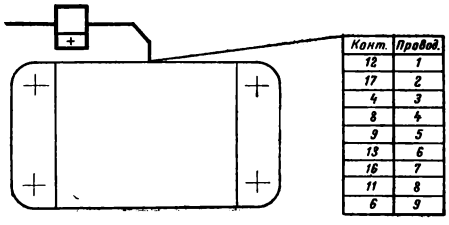


Рис. 10.11. Присоединение проводников к многоконтактному изделию



Конт.	Провод.
12	1
17	2
4	3
8	4
9	5
13	6
16	7
11	8
6	9

Рис. 10.12. Обозначение присоединения к контактам в таблице

Правила выполнения спецификации изделий с электромонтажом. При оформлении документации по способам А и Б (см. выше) в спецификацию сборочного чертежа вносят электрические элементы, электромонтаж которых производят по этому чертежу. Каждому элементу присваивают цифровое позиционное обозначение. Запись элементов электрической принципиальной схемы производят в начале раздела спецификации «Стандартные изделия» группами в порядке расположения буквенно-цифровых позиционных обозначений, приведенных в ГОСТ 2.710-81, если эти элементы выполняются по государственным стандартам, или в том же порядке в разделе «Прочие изделия», если элементы выполняются по отраслевым стандартам или техническим условиям. При записи элементов электрической принципиальной схемы в графе «Примечание» указывают позиционное обозначение, присвоенное этому элементу в схеме.

Проводники (провода, кабели) записывают в раздел «Материалы», при этом в графе «Примечание» указывают: «Устанавливают при электромонтаже».

При оформлении документов по способам В и Г составные части электромонтажного чер-

тежа вносят в дополнительные разделы спецификации сборочного чертежа. Дополнительные разделы размещают, начиная с нового листа, под общим заголовком: «Устанавливают по XXXX.XXXXXX.XXXМЭ» или «Устанавливают при электромонтаже» (при выполнении документации по способу Г). Всем составным частям, внесенным в спецификацию в дополнительных разделах, присваивают номера позиций.

Дополнительными разделами спецификации могут быть: «Сборочные единицы», «Детали», «Стандартные изделия», «Прочие изделия», «Материалы». Нумерация позиций должна быть сквозной по всем разделам спецификации, включая дополнительные. Запись элементов электрической принципиальной схемы, имеющих буквенно-цифровые позиционные обозначения, производят так же, как при оформлении документации по способам А и Б, но в дополнительных разделах «Стандартные изделия» и «Прочие изделия».

Чертежи жгутов, кабелей и проводов

Чертежом жгута является сборочный чертеж изделия, состоящего из двух и более изолированных проводников, соединенных в пучок сплетением, связыванием, и других составных частей (соединительных устройств, наконечников и т. д.).

Чертежом кабеля является сборочный чертеж, если изделие состоит из кабеля или провода в виде детали и каких-либо других составных частей.

Выполняют чертежи жгутов в соответствии с требованиями ЕСКД к чертежам деталей и сборочным чертежам и требованиями ГОСТ 2.414-75. На чертежах жгутов, кабелей и проводов отдельные проводники следует показывать упрощенно, т. е. внешними очертаниями (рис. 10.13), или условно, т. е. одной линией (рис. 10.14). На чертеже жгута или кабеля должны быть нанесены все размеры, необходимые для изготовления изделия. Если чертеж жгута выполнен в натуральную величину, то на нем указывают только размеры участков, изображенных с разрывом. Жгут, который в собранном изделии должен располагаться в разных плоскостях, следует изображать развернутым в плоскости чертежа. На чертеже жгута или кабеля каждый проводник должен иметь обозначение, присвоенное ему на чертеже для электромонтажа или электрической схеме.

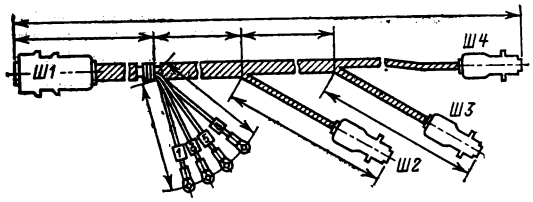


Рис. 10.13. Упрощенное изображение жгута

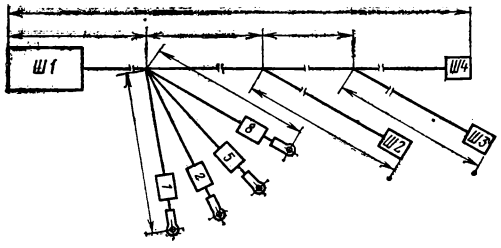


Рис. 10.14. Условное изображение жгута

На изображениях соединительных устройств или около них должны быть нанесены обозначения, присвоенные этим устройствам на электрической принципиальной схеме изделия или на схеме соединений. Взамен изображения мест присоединения проводников (проводов жгута или жил кабеля) указания о присоединениях могут быть приведены одним из следующих способов: в таблице (см. рис. 10.12); в технических требованиях на чертеже; в виде схематического изображения на поле чертежа.

Чертежи изделий с электрическими обмотками и магнитопроводами

На чертежах якорей, статоров и индукторов электрических машин в продольном разрезе, как правило, изображают верхнюю половину предмета; при необходимости изобразить и нижнюю половину дают только его контур.

Электрические обмотки на чертежах якорей (роторов) и статоров в поперечном разрезе изображают так, как показано в табл. 10.2 (ГОСТ 2.415-68).

При изображении поперечного разреза обмотки в наклонных пазах направление штриховки относительно контура паза не изменяется.

При разрезе катушки вдоль проводов обмотки изображают, как показано на рис. 10.15.

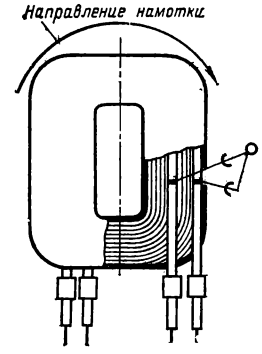


Рис. 10.15. Изображение обмотки в продольном разрезе

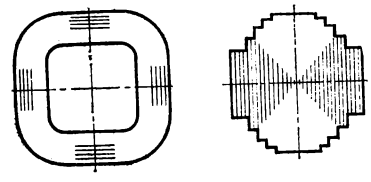
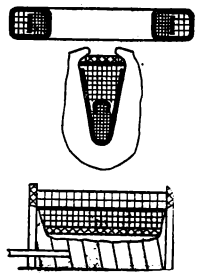
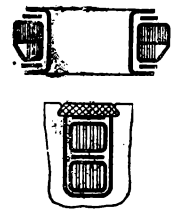
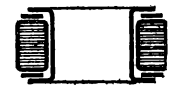
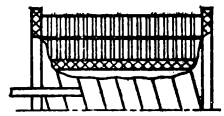


Рис. 10.16. Изображение разрезов и сечений магнитопроводов

Таблица 10.2

Вид обмотки	Изображение
Многовитковая	
Двухвитковая	
Одновитковая	
Стержневая	

Указания о количестве слоев и витков обмотки, изоляции бандажа, а также данные об их расположении помещают в технических требованиях или на линиях-выносках.

На сборочных чертежах изделий с обмотками помещают:

а) схему обмотки;

б) таблицу обмоточных данных, в которой указывают: число витков, номера выводов, сопротивление обмоток и т. д.;

в) данные о пропитке, пайке и лакокрасочном покрытии, указываемые в технических требованиях чертежа.

Изображение шихтованных и витых магнитопроводов и сердечников в поперечных разрезах и сечениях (относительно листов или лент) показано на рис. 10.16 (ГОСТ 2.416-68). Направление линий штриховки должно соответствовать расположению листов или витков лент. Магнитопроводы в разрезах и сечениях вдоль листов не штрихуются. Если секущая плоскость проходит через ось магнитопровода ротора, статора и не совпадает с зубцом, то он условно совмещается с плоскостью разреза и показывается разрезанным. Магнитопроводы на видах показываются как монолитное тело.

Изображение печатных плат

Чертеж печатной платы (ГОСТ 2.417-78) должен содержать: изображение платы с рисунком печатных проводников; размеры, необходимые для изготовления и контроля платы; технические требования. Толщина линий на чертеже должна удовлетворять требованиям микрофильмирования и определяться способом выполнения чертежа и конструкцией печатной платы, при этом допускаются отклонения от ГОСТ 2.303-68.

Размеры печатных проводников, контактных площадок, монтажных отверстий и т. п. на чертеже печатных плат указывают: а) в соответствии с требованиями ГОСТ 2.307-68 с помощью размерных и выносных линий; б) нанесением координатной сетки в прямоугольной системе координат (рис. 10.17); в) нанесением координатной сетки в полярной системе координат (рис. 10.18); г) комбинированным способом, при помощи размерных и выносных линий и координатной сетки в прямоугольной или полярной системе координат.

При задании размеров нанесением координатной сетки линии сетки должны нумероваться. Координатную сетку в зависимости от способа выполнения документации следует наносить либо на все поле чертежа, либо на изображаемую поверхность печатной платы (рис. 10.17, *б*), либо рисками по периметру контура печатной платы (рис. 10.17, *а*).

Основной шаг прямоугольной координатной сетки 2,5 мм (согласно ГОСТ 10317-79). Шаг координатной сетки в полярной системе координат задают по углу и диаметру и назначают в зависимости от расположения закономерно повторяющихся печатных элементов.

За нуль в прямоугольной системе координат на главном виде печатной платы следует принимать: центр крайнего левого нижнего отверстия платы или левый нижний угол платы или левую нижнюю точку, образованную линиями построения.

Участки плат, которые не допускается занимать проводниками, на чертеже обводят штрихпунктирной утолщенной линией.

Для простановки размеров, обозначений шероховатости поверхности, маркировки и т. п. допускается приводить на чертеже дополнительный вид, на котором рисунок печатной платы следует изображать частично. Над таким видом необходимо помещать надпись типа «Вид без проводников».

Круглые отверстия, имеющие зенковку, и круглые контактные площадки с круглыми отверстиями (в том числе с зенковкой) следует изображать одной окружностью. Их форму и размеры следует определять на поле чертежа.

Проводники на чертеже должны изображаться двумя линиями. Отдельные элементы рисунка печатной платы (проводники, экраны, изоляционные участки и т. п.) допускается выделять на чертеже штриховкой, зачернением, растрированием и т. п. (рис. 10.19).

При необходимости указания способа изготовления печатной платы его следует записывать первым пунктом технических требова-

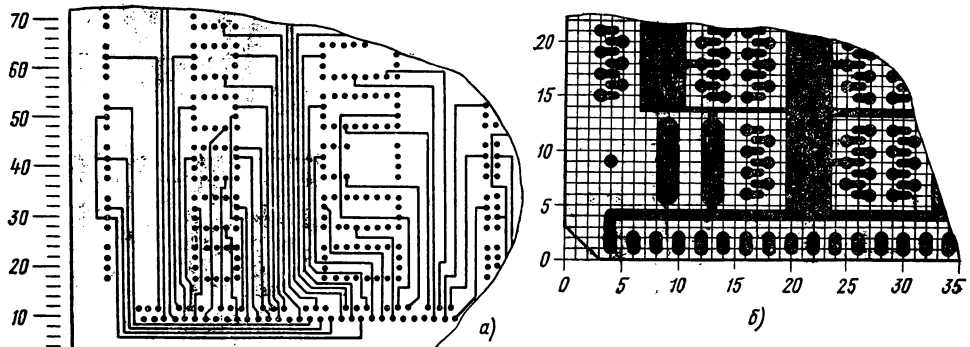


Рис. 10.17. Нанесение координатной сетки в прямоугольной системе координат: *а* — рисками; *б* — на все поле чертежа

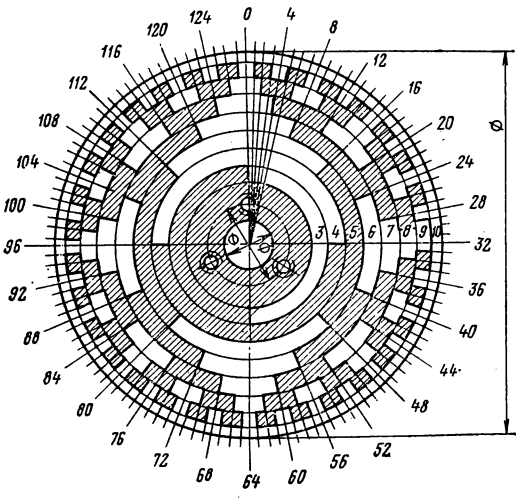


Рис. 10.18. Нанесение сетки в полярной системе координат

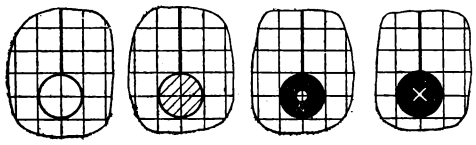


Рис. 10.19. Выделение элементов рисунка печатной платы

ний на чертеже. Остальные технические требования следует группировать и записывать в последовательности, указанной в ГОСТ 2.316-68.

10.4. ОФОРМЛЕНИЕ СХЕМ

Классификация схем

Согласно ГОСТ 2.701-76 схемы в зависимости от вида элементов и связей, входящих в состав изделия, подразделяются на виды, шифруемые буквами русского алфавита:

Вид схемы	Шифр	Вид схемы	Шифр
Электрическая	Э	Вакуумная	В
Гидравлическая	Г	Газовая	Х
Пневматическая	П	Автоматизации	А
Кинематическая	К	Комбинированная	С
Оптическая	Л		

Схемы в зависимости от основного назначения подразделяются на типы, шифруемые арабскими цифрами. В части классификации по типам ГОСТ 2.701-76 и СТ СЭВ 527-77 имеют некоторые отличия:

Тип схемы	Шифр по ГОСТ 2.701-76	Шифр по СТ СЭВ 527-77
Структурная	1	101
Функциональная	2	102
Принципиальная (полная)	3	201
Эквивалентная	—	202
Соединений (монтажная)	4	301
Общая	6	302
Подключения	5	303
Расположения	7	401
Прочие	8	—
Объединенная	0	—
Электрооборудования и проводки	—	402
Электроснабжения и связи	—	403

Наименование схемы определяется ее видом и типом. Например, схема электрическая принципиальная — шифр Э3 согласно ГОСТ 2.701-76. Допускается совмещать схемы следующих типов: принципиальную и соединений, соединений и подключения. Совмещенной схеме присваивают наименование схемы, тип которой имеет наименьший порядковый номер.

При выполнении схемы определенного вида и типа на нескольких листах к шифру схемы, начиная со второго листа, добавляется порядковый номер, например ПВЩМ.113027.256Э3 — схема электрическая принципиальная, шифр первого листа конструкторского документа; ПВЩМ.113027.256Э3.1 — та же схема, шифр второго листа конструкторского документа и т. д.

Общие правила выполнения схем

Общие правила выполнения схем устанавливают: ГОСТ 2.701-76, СТ СЭВ 158-75, ГОСТ 2.702-75. Количество типов схем на изделие

выбирается минимальным, но в совокупности они должны содержать сведения в объеме, достаточном для проектирования, изготовления, эксплуатации, ремонта и контроля изделия.

Форматы листов выбираются в соответствии с требованиями ГОСТ 2.301-68. При выборе форматов следует учитывать условия эксплуатации схем, возможность обработки схем средствами электронной вычислительной техники.

Схемы выполняются без соблюдения масштаба. Действительное пространственное расположение составных частей изделия не учитывается или учитывается приближенно.

Графические обозначения и соединяющие их линии связи следует располагать на поле схемы таким образом, чтобы обеспечить наилучшее представление о структуре изделия и взаимодействии его составных частей в сочетании с компактностью изображения. При этом следует избегать изломов и пересечений линий электрической связи.

Линии связи должны состоять из горизонтальных и вертикальных отрезков. В отдельных случаях, если это упрощает графику схемы, допускается применять наклонные участки линий. Расстояние между соседними параллельными линиями связи должно быть не менее 3 мм.

Схемы могут выполняться на нескольких листах. При этом рекомендуется изображать на каждом листе определенную функциональную часть, например цепи управления, силовые или часть схемы изделия, расположенную в определенном месте, например пост, панель и т. д.

Электрические элементы и устройства на схеме изображают в состоянии, соответствующем обесточенному. При отклонении от этого правила необходимо давать соответствующие указания на поле схемы (СТ СЭВ 1188-78).

Графическое слияние линий электрической связи, не имеющих общего функционального назначения, в групповые линии связи применяется для уменьшения на схеме количества линий. При этом линии, сливаемые в групповую связь, должны быть обозначены порядковыми номерами в местах слияния и разветвления.

Однолинейное представление нескольких линий электрической связи, имеющих общее функциональное назначение, применяется для уменьшения количества параллельных линий, следующих в одном направлении. Начертание и обозначение однолинейного представления линий связи приведено на рис. 10.20.

Обрывы линий электрической связи применяют, если графические обозначения соединяемых элементов значительно удалены друг от друга и если схема выполняется на нескольких листах. Обрывы линий заканчивают стрелками с указанием мест подключения.

Для изображения на электрических схемах элементов и устройств применяют следующие графические обозначения:

а) условные графические обозначения, установленные соответствующими стандартами ЕСКД;

б) прямоугольники произвольных размеров с поясняющим текстом;

в) внешние очертания;

г) прямоугольники, выполненные штрих-

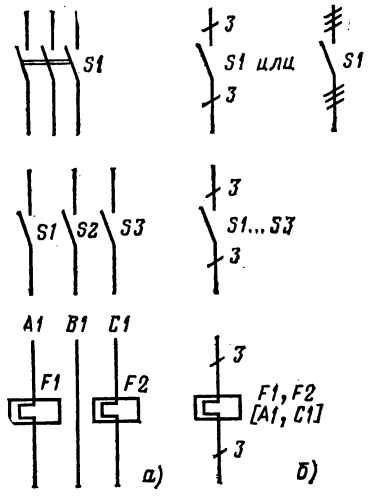


Рис. 10.20. Способы изображения схем: *а* — многолинейный; *б* — однолинейный

пунктирной линией для выделения устройств и функциональных групп.

Текстовая информация на схемах может иметь следующую форму записи:

а) условные буквенно-цифровые обозначения (по ГОСТ 2.710-81);

б) наименование элементов, сигналов, функциональных групп и др.;

в) сплошной текст, например технические требования, пояснения;

г) текст, разбитый на графы, например таблицы, перечень элементов.

На схеме для каждого устройства или элемента должны быть указаны: наименование, тип и обозначение документа, на основании которого они применены. Эти данные записывают:

около графических обозначений (для элемента, изображенного условным графическим обозначением, наименования не указывают);

внутри прямоугольника, если он применен для обозначения элемента или устройства;

в таблице перечня элементов.

Правила выполнения структурных и функциональных схем

Структурная схема определяет основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи и служит для общего ознакомления с изделием.

Составные функциональные части изделия изображают в виде прямоугольников или условных графических обозначений.

Все необходимые данные об элементах записывают, как правило, около графических обозначений. Допускается помещать эти данные в таблице, размещаемой на поле схемы. В этом случае над изображением элемента или справа от него проставляют порядковые номера сверху вниз в направлении слева направо.

На линиях взаимосвязи рекомендуется стрелками обозначать направление хода процессов, происходящих в изделии. Допускается помещать на схеме поясняющие надписи, диа-

граммы и таблицы, определяющие последовательность процессов во времени, а также указывать параметры в характерных точках (значения токов, напряжений, формы и значения импульсов, математические зависимости и т. п.).

Функциональные схемы разъясняют определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или в изделии в целом. Этими схемами пользуются для изучения принципа работы изделий, а также при их наладке, контроле, ремонте.

При разработке функциональных схем используют те же правила, что и для структурных схем, за исключением позиционных обозначений элементов. Порядковые номера элементам и устройствам на функциональных схемах не присваивают, а указывают буквенно-цифровые позиционные обозначения, присвоенные им на принципиальной схеме.

При выполнении функциональных схем рекомендуется пользоваться правилами выполнения принципиальных схем в части способов построения схемы (совмещенный, разнесенный — см. ниже).

Правила выполнения принципиальных схем

Электрическая принципиальная схема определяет полный состав элементов изделия и связи между ними и дает детальное представление о принципе работы изделия. Принципиальная схема служит основанием для разработки схем соединения, подключения, общих.

На принципиальной схеме изображают все электрические элементы и устройства, необходимые для осуществления заданных электрических процессов, все связи между ними; элементы подключения (соединители, зажимы) входных и выходных цепей, а также их характеристики.

Элементы на принципиальной схеме изображают в виде условных графических обозначений согласно соответствующим ГОСТ ЕСКД.

Устройства, имеющие самостоятельные принципиальные схемы, изображают в виде прямоугольников или условных графических обозначений. Допускается в прямоугольники, изображающие устройства, помещать структурные или функциональные схемы, либо полностью или частично повторять принципиальные схемы этих устройств.

Каждому элементу или устройству, входящему в схему, должно быть присвоено буквенно-цифровое позиционное обозначение согласно ГОСТ 2.710-81. Буквенно-цифровые обозначения следует присваивать элементам в соответствии с последовательностью расположения их на схеме сверху вниз в направлении слева направо. Порядковые номера присваивают элементам, начиная с единицы в пределах группы элементов, имеющих на схеме одинаковые буквенные обозначения, например: *R1*, *R2*, *R3* и т. д., *C1*, *C2*, *C3* и т. д. Позиционные обозначения проставляют на схеме рядом с условным графическим обозначением элемента с правой стороны или над ним.

Элементы и устройства на схеме размещают совмещенным или разнесенным способом (рис. 10.21). Разнесенным способом выполняют схемы телефонии и автоматики, схемы электрооборудования, где много контакторов, реле и различных контактов. При выполнении таких схем рекомендуется пользоваться строчным способом, располагая условные графические обозначения элементов последовательно друг за другом, а отдельные цепи — одну под другой. Таким образом образуются параллельные строки, которые рекомендуется нумеровать арабскими цифрами.

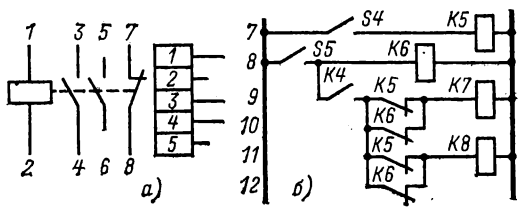


Рис. 10.21. Примеры изображения элементов устройства:

а — совмещенным способом; *б* — разнесенным способом

На схеме рекомендуется указывать характеристики входных и выходных цепей изделия (частоту, напряжение, ток и т. п.), а также адреса внешних подключений. Эти данные рекомендуется указывать в таблице, заменяющей изображение разъема (рис. 10.22). Каждой таблице присваивают позиционное обозначение элемента, взамен условного графического обозначения которого она помещена.

На принципиальной схеме должны быть однозначно определены все элементы, изображенные на схеме. Данные об элементах (наименование, тип, документ, на основании которого элемент применен) записывают в таблицу перечня элементов (рис. 10.23). Перечень элементов заполняют сверху вниз в алфавитном порядке буквенных позиционных обозначений. При записи одинаковых по наименованию элементов рекомендуется объединять их в группы, выполнять общий заголовок, например «Резисторы», подчеркивать его тонкой чертой и записывать в графе «Наименование» только тип

Конт.	Цепь	Адрес
1	Δf =0,3... 3кГц; $R_н$=600 Ом	=A1-X1:1
2	$U_{вых}$=0,5В; $R_н$=600 Ом	=A1-X1:2
3	$U_{вых}$= +60В; $R_н$=500 Ом	=A1-X1:3
4	$U_{вых}$= +20В; $R_н$= 1кОм	=A1-X1:4

Рис. 10.22. Обозначения входных и выходных элементов

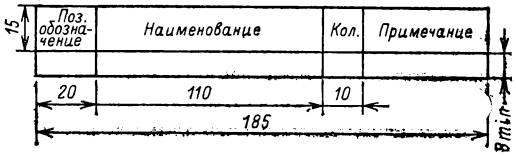


Рис. 10.23. Изображение таблицы перечня элементов

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
	Резисторы		
R1	*МЛТ-0,5-300кОм±5% ГОСТ 7113-77*	*1*	
R2	*ІСП-І-А-560Ом±10%-ОС-3-12 ГОСТ 5574-73*	*1*	
R3	*ПЭВ-10-3кОм±5% ГОСТ 6513-75*	*1*	

Рис. 10.24. Заполнение перечня элементов

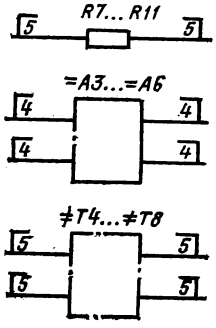


Рис. 10.25. Обозначение нескольких одинаковых элементов или устройств, соединенных параллельно

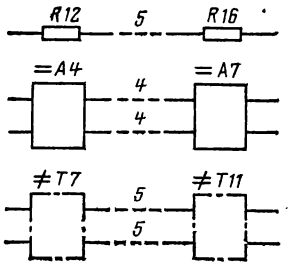


Рис. 10.26. Обозначение нескольких одинаковых элементов или устройств, соединенных последовательно

и документ, на основании которого этот элемент применен. В пределах одного наименования элементы располагают по возрастанию порядковых номеров. Элементы одного типа с одинаковыми параметрами, имеющие на схеме последовательные порядковые номера, рекомендуется записывать в перечень в одну строку. При этом в графе «Поз. обозначение» указывают позиционные обозначения всех элементов, например *R2, ..., R5*, а в графе «Кол.»— общее количество таких элементов. Наименование элементов в таких случаях записывают в единственном числе. Между группами элементов, а также между отдельными элементами рекомендуется оставлять незаполненные, резервные строчки. Пример заполнения перечня элементов приведен на рис. 10.24.

При наличии в изделии нескольких одинаковых элементов, устройств или функциональных групп, соединенных параллельно, рекомендуется вместо изображения всех ветвей параллельного соединения изображать только одну ветвь, указав количество ветвей при помощи обозначения ответвления. Около графических обозначений элементов проставляют их позиционные обозначения. При этом должны быть учтены все элементы, входящие в параллельное соединение (рис. 10.25).

При наличии в изделии трех и более одинаковых элементов, устройств или функциональных групп, соединенных последовательно, допускается вместо изображения всех последовательно соединенных элементов изображать только первый и последний элементы, показывая электрические связи между ними штриховой линией. При присвоении элементам позиционных обозначений учитываются все элементы, не изображенные на схеме. Над штриховой линией указывают общее количество одинаковых элементов (рис. 10.26).

При оформлении принципиальной схемы изделий, в состав которых входят устройства, имеющие самостоятельные принципиальные схемы, каждое такое устройство рассматривают как элемент схемы, изображают в виде прямоугольника или условного графического обозначения, присваивают ему позиционное обозначение и записывают в перечень элементов одной позицией.

На схеме следует указывать обозначения выводов (контактов) элементов, нанесенные на изделие или установленные в их документации; если таких указаний нет, то допускается условно присваивать контактам элементов обозначения на схеме; при этом на поле схемы помещают соответствующее пояснение.

В технических требованиях допускается указывать марку, сечение, расцветку проводов и кабелей, которыми должны быть выполнены соединения элементов, а также требования к электрическому монтажу.

Правила выполнения схем соединений и подключения

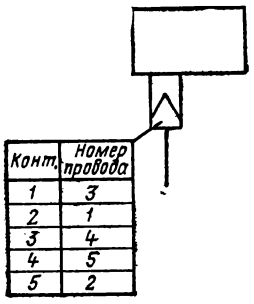
Схема соединений показывает соединения составных частей изделия и определяет провода, жгуты, кабели, которыми осуществляются эти соединения, а также места их присоединения и ввода (зажимы, соединители). Схемами соединений пользуются при разработке других конструкторских документов, а также при наладке, контроле, ремонте и эксплуатации изделий.

На схеме соединений должны быть изображены все устройства и элементы, входящие в состав изделия, их входные и выходные элементы, а также соединения между ними.

Элементы и устройства на схеме изображают в виде прямоугольников, внешних очертаний или условных графических обозначений. На схеме около графических обозначений устройств и элементов указывают позиционные обозначения, присвоенные им на электрической принципиальной схеме.

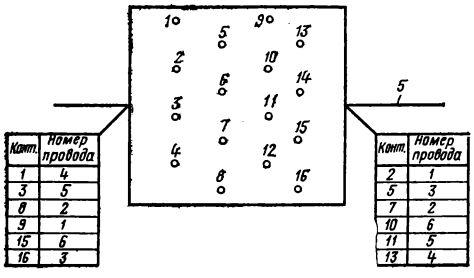
Расположение графических обозначений устройств и элементов на схеме должно примерно соответствовать действительному размещению их в изделии. Входные и выходные элементы изображают условными графическими обозначениями или оформляют в виде таблицы (см. рис. 10.22). Допускается применять условные графические обозначения соединителей, не показывающие отдельные контакты. При этом около соединителя помещают таблицы с указанием подключения контактов (рис. 10.27) или помещают эти сведения в таблице соединений на поле схемы.

На схеме изделия, в состав которого входят многоконтактные элементы, линии, изобра-



Конт.	Номер провода
1	3
2	1
3	4
4	5
5	2

Рис. 10.27. Изображение таблицы подключения контактов



Конт.	Номер провода
1	4
3	5
6	2
9	1
15	6
16	3

Конт.	Номер провода
2	1
5	3
7	2
10	6
11	5
13	4

Рис. 10.28. Изображение таблицы подключения к многоконтактному изделию

жающие жгуты и кабели, допускается доводить только до контура графического обозначения элемента, не показывая присоединения к контактам. При этом у изображения многоконтактного изделия помещают таблицу с указанием подключения контактов (рис. 10.28).

Провода, группы проводов, жгуты и кабели указывают по правилам, установленным ГОСТ 2.709-72 и ГОСТ 2.751-73, обозначают порядковыми номерами в пределах изделия. Сведения о проводах и кабелях записывают в таблицу соединений. Таблица заполняется сверху вниз в порядке возрастания номеров проводов. При этом вначале записывают отдельные провода (без заголовка), а затем (с соответствующими заголовками) жгуты проводов и кабели. Форма и размеры таблицы соединений приведена на рис. 10.29.

На поле схемы над основной надписью допускается помещать: данные о проводах и кабелях, требования о недопустимости совместной прокладки некоторых проводов, минимально допустимые расстояния между проводами и др.

Схема подключения показывает внешние подключения изделия. На схеме подключения

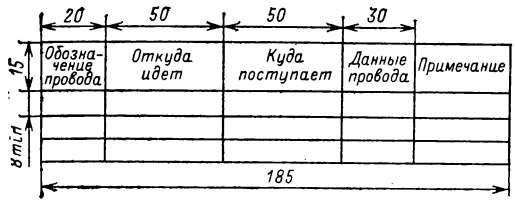


Рис. 10.29. Таблица соединений

должно быть изображено изделие в виде прямоугольника, его входные и выходные элементы — в виде условных графических обозначений и подводимые к ним концы проводов и кабелей внешнего монтажа.

Размещение изображений входных и выходных элементов должно примерно соответствовать их действительному размещению в изделии. Правила выполнения схем подключения те же, что и схем соединения.

Правила выполнения схем общих и расположения

Общая схема определяет составные части комплекса и соединения их между собой на месте эксплуатации. На общей схеме должны быть изображены устройства и элементы, входящие в комплекс, в виде прямоугольников, входные и выходные элементы этих устройств в виде условных графических обозначений, а также провода, жгуты и кабели, соединяющие эти устройства и элементы.

Размещение графических обозначений устройств на схеме, а также входных и выходных элементов внутри устройств должно примерно соответствовать их действительному размещению в изделии. При изображении входных и выходных элементов (соединителей) допускается указывать количество их контактов внутри изображения разъема.

Провода, жгуты и кабели изображают и обозначают по правилам оформления схем соединений (см. выше).

Схема расположения показывает относительное расположение составных частей изделия, а также проводов, жгутов, кабелей. Составные части изделия изображают в виде внешних очертаний или условных графических обозначений; провода, жгуты, кабели—в виде отдельных линий или внешних очертаний.

Расположение графических обозначений составных частей изделия на схеме должно давать правильное представление об их действительном размещении в конструкции, помещении. При выполнении схем расположения применяют различные способы построения (аксонометрия, план, условная развертка, разрез конструкции). Схема расположения может сопровождаться перечнем элементов, если затруднено нанесение данных о составных частях изделия на поле схемы.

Правила выполнения электрических схем обмоток и изделий с обмотками (по ГОСТ 2.705-70)

Для обмоток и изделий с обмотками выполняют схемы: структурные, принципиальные, соединений, подключения, расположения. При этом пользуются правилами ГОСТ 2.702-75, изложенными выше. При выполнении схем соединений и расположения, кроме того, учитывают требования ГОСТ 2.705-75.

На схеме соединений, кроме электрических элементов, допускается изображать части магнитопровода и отдельные элементы конструкции, указывать направление тока (рис. 10.30).

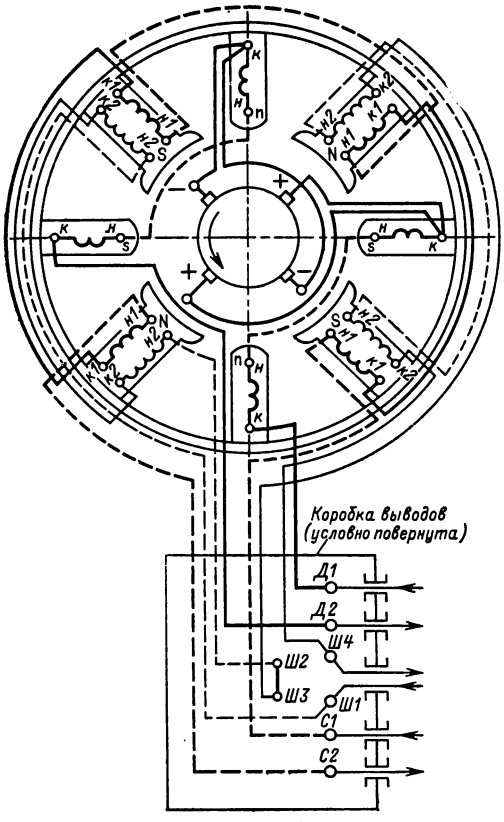


Рис. 10.30. Пример электрической схемы соединений электродвигателя (применительно к виду со стороны коллектора)

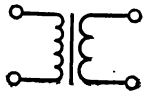


Рис. 10.31. Изображение обмоток трансформатора

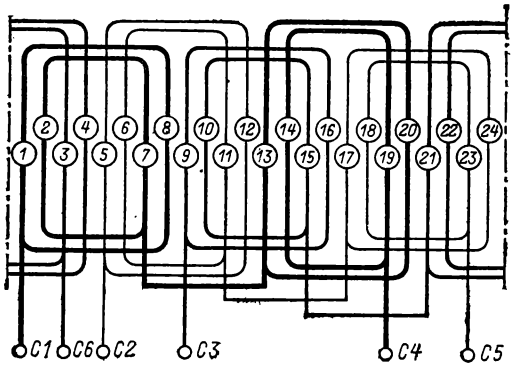


Рис. 10.32. Пример электрической схемы соединений обмоток статора (при развертке на плоскость)

При одинаковых соединениях элементов в многофазных изделиях (например, катушек в обмотке трехфазного трансформатора) на схеме допускается изображать элементы и их соединения только в одной фазе. При этом на поле схемы приводят указания о соединениях в остальных фазах.

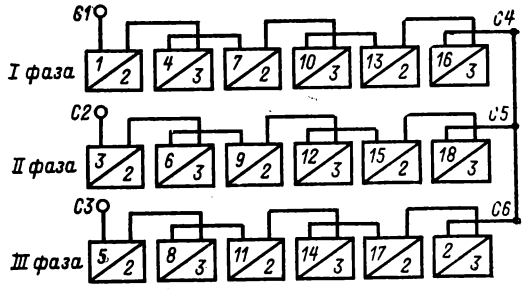


Рис. 10.33. Пример электрической схемы соединений с расположением изображения обмоток статора, определяемым удобством чтения схемы

Элементы обмотки изображают в соответствии с требованиями ГОСТ 2.723-68, изложенными ниже. Для выделения различных обмоток допускается выполнять полуокружности в условном графическом обозначении разными радиусами (рис. 10.31). Дисковые катушки показывают в виде утолщенных отрезков линий.

При выполнении схем соединений используют сплошные основные и штриховые линии различной толщины для выделения элементов, принадлежащих к разным обмоткам (рис. 10.30, 10.32). Штриховыми линиями показывают элементы обмоток и соединения, расположенные со стороны, противоположной изображенному на схеме виду (рис. 10.30).

Начала и концы обмоток обозначают арабскими цифрами, буквами (*Н* — начало, *К* — конец — рис. 10.30) или точками, наносимыми около начала элемента обмотки.

Полярность главных полюсов электрических машин обозначают буквами *N* (северный) и *S* (южный), добавочных — соответственно буквами *n* и *s* (рис. 10.30).

Пазы нумеруют арабскими цифрами (рис. 10.32).

На поле схемы допускается помещать необходимые технические данные: число пазов, шаг по пазам и коллектору, число полюсов, число фаз, число пазов на полюс и фазу, число параллельных ветвей, число коллекторных пластин, вид обмотки и т. п.

Схемы соединений выполняют с расположением изображений обмотки:

а) при развертке ее на плоскость (см. рис. 10.32);

б) применительно к виду на изделие с определенной стороны (см. рис. 10.30);

в) определяемым удобством чтения схемы (рис. 10.33).

На рис. 10.33 элементы обмотки (катушечные группы) изображены в виде прямоугольников. Над диагональю прямоугольника указывают номер катушечной группы, под диагональю — число катушек в катушечной группе.

Правила выполнения схем цифровой вычислительной техники (по ГОСТ 2.708-81)

Типы электрических схем для изделий цифровой вычислительной техники и правила

выполнения должны соответствовать требованиям ГОСТ 2.701-76 и ГОСТ 2.702-75, приведенным выше.

При выполнении структурных схем допускается применять условные графические обозначения по табл. 10.3.

При выполнении функциональных схем допускается применять условные графические обозначения по табл. 10.4.

Размер H для условных графических обозначений структурных и функциональных схем должен выбираться из ряда 10, 15 мм и далее через 5 мм. Размер $L = 1{,}5\ H$.

Допускается совмещать условные графические обозначения функциональных частей по большей стороне условного графического обозначения, если выходы одной полностью соответствуют входам другой (рис. 10.34).

Таблица 10.3

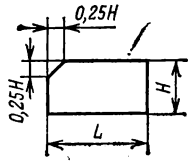
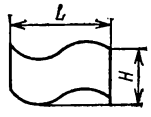
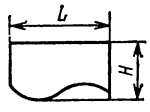
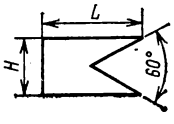
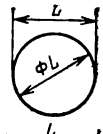
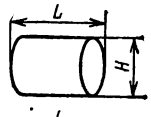
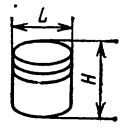
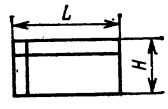
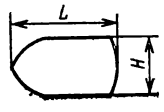
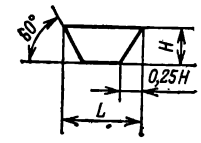
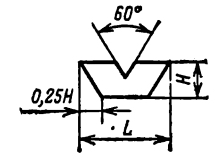
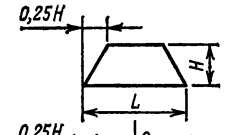
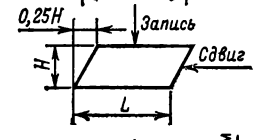
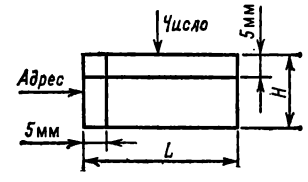
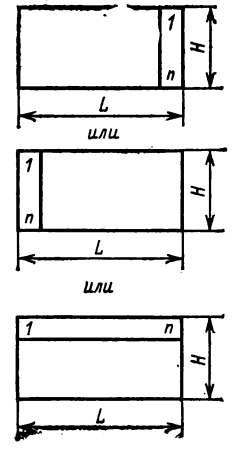
Наименование	Обозначение
Устройства, в которых в качестве носителя данных применяют перфокарты	
Устройства, в которых в качестве носителя данных применяют перфоленты	
Печатающее устройство	
Накопитель на магнитных картах	
Накопитель на магнитной ленте	
Накопитель на магнитном барабане	
Накопитель на магнитном диске	
Запоминающее устройство	
Визуальное устройство ввода-вывода	

Таблица 10.4

Наименование	Обозначение
Комбинационный элемент. Общее обозначение для элементов типа свертки, избирательной схемы, шифратора и др.	
Сумматор на два числа	
Суммятор на n чисел	
Дешифратор	
Регистратор сдвига	
Элемент памяти	
Приоритетные схемы	

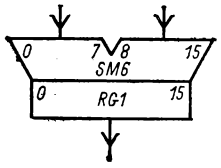


Рис. 10.34. Пример совмещения условных графических обозначений элементов цифровой вычислительной техники

Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах (по ГОСТ 2.710-81)

В зависимости от назначения и характера передаваемой информации устанавливаются следующие типы обозначений:

Тип условного обозначения	Классифицирующий символ	Примечание
Высшего уровня:		
устройство	=	
функциональная группа	≠	Допускается #
Конструктивное обозначение	+	Указывает место расположения элемента в конструкции
Обозначение элемента	—	
Обозначение электрического контакта	:	
Адресное обозначение	( )	Обозначение заключают в круглые скобки

Условное буквенно-цифровое обозначение записывают в виде последовательности букв, цифр и знаков в одну строку без пробелов и их количество в обозначении не устанавливается.

Порядок записи обозначений высшего уровня и конструктивных определяется порядком вхождения, например *≠T1-A2-R5* означает резистор *R5* (табл. 10.5) входит в состав уст-

Таблица 10.5. **Буквенные коды элементов**

Примеры видов элементов	Код
Устройство. Общее обозначение	*A*
Преобразователи неэлектрических величин в электрические (кроме генераторов и источников питания); аналоговые и многоразрядные преобразователи; датчики для указания или измерения	*B*
громкоговоритель	*BA*
магнитострикционный элемент	*BB*
детектор ионизирующих излучений	*BD*
сельсин-приемник	*BE*
телефон (капсюль)	*BF*
сельсин-датчик	*BC*
тепловой датчик	*BK*
фотоприемник	*BL*
микрофон	*BM*
датчик давления	*BP*
пьезоэлемент	*BQ*
датчик частоты вращения (тахогенератор)	*BR*
звукосниматель	*BS*
датчик скорости	*BV*
Конденсаторы	*C*
Схемы интегральные, микросборки	*D*
схема интегральная аналоговая	*DA*
схема интегральная цифровая, логический элемент	*DD*
устройство хранения информации	*DS*
устройство задержки	*DT*
Элементы разные	*E*

Продолжение табл. 10.5

Примеры видов элементов	Код
В том числе:	
нагревательный элемент	*EK*
лампа осветительная	*EL*
пиропатрон	*ET*
Разрядники, предохранители, устройства защитные	*F*
В том числе:	
дискретный элемент защиты по току мгновенного действия	*FA*
дискретный элемент защиты по току инерционного действия	*FP*
предохранитель плавкий	*FU*
дискретный элемент защиты по напряжению, разрядник	*FV*
Генераторы, источники питания	*G*
батарея	*GB*
Устройства индикационные и сигнальные	*H*
прибор звуковой сигнализации	*HA*
индикатор символьный	*HG*
прибор световой сигнализации	*HL*
Реле, контакторы, пускатели	*K*
реле токовое	*KA*
реле указательное	*KH*
реле электротепловое	*KK*
контактор, магнитный пускатель	*KM*
реле времени	*KT*
реле напряжения	*KV*
Катушки индуктивности, дроссели, реакторы	*L*
Двигатели	*M*
Приборы измерительные	*P*
амперметр	*PA*
счетчик импульсов	*PC*
частотомер	*PF*
счетчик активной энергии	*PI*
счетчик реактивной энергии	*PK*
омметр	*PR*
регистрирующий прибор	*PS*
часы, измеритель времени, действия	*PT*
вольтметр	*PV*
ваттметр	*PW*
Выключатели и разъединители в силовых цепях	*Q*
выключатель автоматический	*QF*
короткозамыкатель	*QK*
разъединитель	*QS*
Резисторы	*R*
терморезистор	*RK*
потенциометр	*RP*
шунт измерительный	*RS*
варистор	*RU*
Устройства коммутационные в цепях управления, сигнализации и измерительных	*S*
выключатель или переключатель	*SA*
выключатель кнопочный	*SB*
выключатель автоматический	*SF*
выключатель, срабатывающий от различных воздействий:	
от уровня	*SL*
от давления	*SP*
от положения (путевой)	*SQ*
от частоты вращения	*SR*
от температуры	*SK*
Трансформаторы, автотрансформаторы	*T*
трансформаторы тока	*TA*
электромагнитный стабилизатор	*TS*
трансформатор напряжения	*TV*
Устройства связи. Преобразователи электрических величин в электрические	*U*
модулятор	*UB*
демодулятор	*UR*
дискриминатор	*UI*
преобразователь частоты, инвертор, генератор частоты, выпрямитель	*UZ*
Приборы электровакуумные и полупроводниковые	*V*
диод, стабилитрон	*VD*
прибор электровакуумный	*VL*
транзистор	*VT*
тиристор	*VS*

Продолжение табл. 10.5

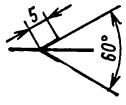
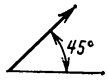
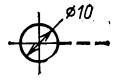
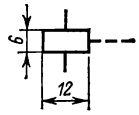
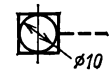
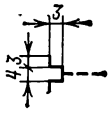
Примеры видов элементов	Код
Линии и элементы СВЧ. Антенны	*W*
ответвитель	*WE*
короткозамыкатель	*WK*
вентиль	*WS*
трансформатор, фазовращатель	*WT*
аттенюатор	*WU*
антенна	*WA*
Соединения контактные	*X*
токосъемник, контакт скользящий	*XA*
штырь	*XP*
гнездо	*XS*
соединение разборное	*XT*
соединитель высокочастотный	*XW*
Устройства механические с электромагнитным приводом	*Y*
электромагнит	*YA*
тормоз с электромагнитным приводом	*YB*
муфта с электромагнитным приводом	*YC*
электромагнитный патрон или плита	*YH*
Устройства оконечные. Фильтры. Ограничители	*Z*

ройства *A2*, которое входит в функциональную группу *T1*. Перед обозначением устройства, функциональной группы или элемента, стоящим в начале составного обозначения, допускается не указывать классифицирующий символ, если это не приведет к неправильному пониманию обозначения, например *K1* : 2 — второй контакт реле *K1*.

10.5. УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СХЕМАХ

Обозначения общего применения (ПО ГОСТ 2.721-74)

Продолжение табл. 10.5

Наименование	Обозначение
Поток электромагнитной энергии, сигнал электрический:	
а) в одном направлении	
б) в обоих направлениях одновременно	
Регулирование линейное (общее обозначение):	
а) регулирование плавное	
б) регулирование ступенчатое	
в) регулирование по току	
г) регулирование ручкой	
д) регулирование нелинейное	
е) регулирование подстроечное	
ж) саморегулирование линейное	
з) саморегулирование нелинейное	
Элементы привода и управляющих устройств:	
а) привод электромашинный	
б) привод электромагнитный	
в) привод тепловой	
г) привод с помощью биметалла	

Электрические машины (по ГОСТ 2.722-68)

Устанавливаются три способа построения условных графических обозначений электрических машин: упрощенный однолинейный; упрощенный многолинейный (форма I); развернутый (форма II).

В упрощенных однолинейных обозначениях электрических машин обмотки статора и ротора изображают в виде окружностей. Выводы обмоток статора и ротора показывают одной линией с указанием на ней количества выводов в соответствии с требованиями ГОСТ 2.751-73.

В упрощенных многолинейных обозначениях обмотки статора и ротора изображают аналогично упрощенным однолинейным обозначениям, показывая выводы обмоток статора и ротора полностью.

В развернутых обозначениях обмотки статора изображают в виде цепочек полуокружностей, а обмотки ротора — в виде окружности (и наоборот).

Взаимное расположение обмоток изображают:

а) в машинах переменного тока и универсальных — с учетом или без учета сдвига фаз;

б) в машинах постоянного тока — с учетом или без учета направления магнитного поля, создаваемого обмоткой.

В примерах условных графических обозначений машин переменного тока и универсальных машин приведены обозначения, как правило, отражающие сдвиг фаз в обмотке; в примерах машин постоянного тока, как правило, без учета направления магнитного поля.

Выводы обмоток статора и ротора в обозначениях машин всех типов допускается изображать с любой стороны.

Наименование	Обозначение
Обозначения элементов электрических машин	
Обмотка добавочных полюсов, обмотка компенсационная	
Обмотка статора машины переменного тока, обмотка последовательного возбуждения машины постоянного тока	
Обмотка параллельного возбуждения машины постоянного тока, обмотка независимого возбуждения	
Статор. Общее обозначение	
Статор с трехфазной обмоткой:	Форма I Форма II
а) соединенной в треугольник	
б) соединенной в звезду	
Ротор. Общее обозначение	
Ротор без обмотки:	
а) полый немагнитный или ферромагнитный	
б) явнополюсный с прорезями по окружности	
в) явнополюсный с постоянными магнитами	
Ротор с распределенной обмоткой:	
а) трехфазный, соединенный в звезду	
б) трехфазный, соединенный в треугольник	
в) однофазный или постоянного тока	
г) короткозамкнутый	
Ротор внешний с короткозамкнутой распределенной обмоткой	
Ротор явнополюсный с сосредоточенной обмоткой возбуждения	
Ротор явнополюсный с сосредоточенной обмоткой возбуждения и распределенной короткозамкнутой демпферной или пусковой обмоткой	

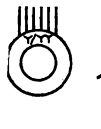
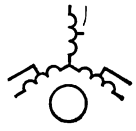
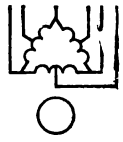
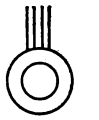
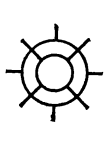
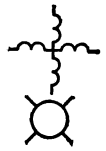
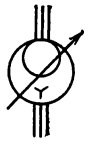
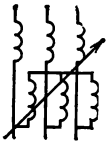
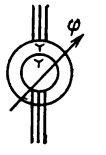
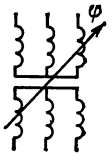
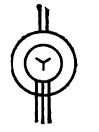
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Ротор с обмоткой, коллектором и щетками	
Ротор со щетками на контактных кольцах	
Машина электрическая. Общее обозначение	
Примечание. Внутри окружности допускается указывать следующие данные: а) род машины (генератор — *G*, двигатель — *M*, возбудитель — *B*, тахогенератор — *BR* и др.); б) род тока, число фаз или вид соединения обмоток в соответствии с требованиями ГОСТ 2.750-68, например генератор трехфазный	
Размеры условных графических обозначений (по ГОСТ 2.747-68):	
а) статор электрической машины	
б) ротор электрической машины, обмотка трансформатора	
в) обмотка, катушка индуктивности	
Размеры обозначений щеток:	
а) на контактных кольцах	
б) на коллекторе	

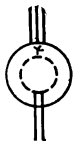
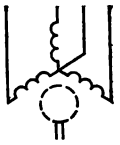
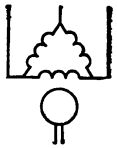
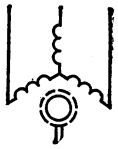
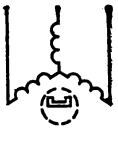
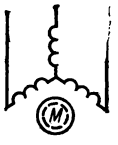
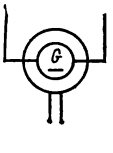
Примеры построения обозначений электрических машин

	Форма I Форма II
Машина асинхронная трехфазная с фазным ротором; обмотка ротора соединена в звезду, обмотка статора — в треугольник	

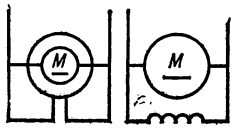
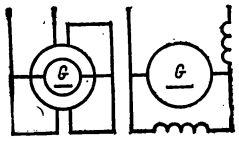
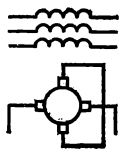
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение	
	Форма I	Форма II
Машина асинхронная с переключением обмотки статора на два числа полюсов с короткозамкнутым ротором. Переключение обмотки статора:		
а) со звезды на звезду с двумя параллельными ветвями		
б) с треугольника на звезду с двумя параллельными ветвями		
Машина асинхронная двухфазная:		
а) с короткозамкнутым ротором		
б) с полым немагнитным ротором и неподвижным ферромагнитным магнитопроводом		
Трансформатор вращающийся, фазовращатель		
Автотрансформатор трехфазный поворотный (потенциал-регулятор)		
Трансформатор трехфазный поворотный (фазорегулятор)		
Сельсин-датчик, сельсин-приемник контактные однофазные с обмоткой возбуждения на статоре и обмоткой синхронизации на роторе, соединенной в звезду		

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение	
	Форма I	Форма II
Машина синхронная трехфазная явнополюсная с обмоткой возбуждения на роторе; обмотка статора соединена в звезду с выведенной нейтральной точкой		
Машина синхронная трехфазная неявнополюсная с обмоткой возбуждения на роторе; обмотка статора соединена в треугольник		
Машина синхронная трехфазная явнополюсная с обмоткой возбуждения и пусковой короткозамкнутой обмоткой на роторе; обмотка статора соединена в звезду		
Машина синхронная трехфазная с возбуждением от постоянных магнитов; обмотка статора соединена в звезду		
Машина синхронная однофазная явнополюсная с обмоткой возбуждения и демпферной или пусковой обмоткой на роторе		
Двигатель гистерезисный; обмотка статора соединена в звезду		
Машина постоянного тока с независимым возбуждением		

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
	Форма I Форма II
Машина постоянного тока с последовательным возбуждением	
Машина постоянного тока с параллельным возбуждением	
Машина постоянного тока со смешанным возбуждением	
Машина постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов	
Усилитель электромашинный с поперечным потоком и несколькими обмотками управления	

Катушки индуктивности, реакторы, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители (по ГОСТ 2.723-68)

Устанавливается три способа построения условных графических обозначений трансформаторов и автотрансформаторов:

упрощенный однолинейный;

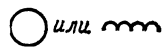
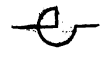
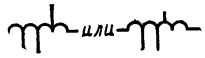
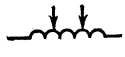
упрощенный многолинейный (форма I);

развернутый (форма II).

В упрощенных однолинейных обозначениях обмотки трансформаторов и автотрансформаторов изображают в виде окружности. Выводы обмоток показывают одной линией с указанием на ней количества выводов в соответствии с требованиями ГОСТ 2.751-73. В автотрансформаторах сторону высшего напряжения изображают в виде развернутой дуги.

В упрощенных многолинейных обозначениях обмотки трансформаторов и автотрансформаторов изображают аналогично упрощенным однолинейным обозначениям, показывая выводы обмоток.

В развернутых обозначениях обмотки трансформаторов и автотрансформаторов показывают в виде цепочек полуокружностей.

Наименование	Обозначение
Обозначение элементов катушек индуктивностей, дросселей, трансформаторов, автотрансформаторов и магнитных усилителей	
Обмотка трансформатора, автотрансформатора, дросселя и магнитного усилителя	
Примечания: 1. Количество полуокружностей в изображении обмотки и направление выводов не устанавливаются	
2. При изображении магнитных усилителей разнесенным способом используют следующие обозначения:	
а) рабочая обмотка	
б) управляющая обмотка	
3. Для указания начала обмотки используют точку	
Магнитопровод:	
а) ферромагнитный	
б) ферромагнитный с воздушным зазором	
в) магнитодиэлектрический	
Характер кривой намагничивания отражают при помощи следующих знаков:	
а) прямоугольная петля гистерезиса	
б) непрямоугольная петля гистерезиса	
Примечание. Размеры условных графических обозначений обмоток даны вместе с размерами обозначений электрических машин (см. выше)	
Примеры построения обозначений катушек индуктивности, дросселей, трансформаторов, автотрансформаторов и магнитных усилителей	
Катушка индуктивности, дроссель без магнитопровода	
Реактор	
Катушка индуктивности с отводами	
Катушка индуктивности со скользящими контактами	
Катушка индуктивности с магнитодиэлектрическим магнитопроводом	
Катушка индуктивности, подстраиваемая магнитодиэлектрическим магнитопроводом	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Реактор (дроссель) с магнитопроводом	
Вариометр	
Гониометр	
Трансформатор без магнитопровода:	
а) с постоянной связью	
б) с переменной связью	
Трансформатор однофазный с магнитопроводом	
Трансформатор однофазный с магнитопроводом трехобмоточный	
Трансформатор трехфазный с магнитопроводом, соединение обмоток звезда — звезда с выведенной нейтральной точкой	
Трансформатор трехфазный трехобмоточный с магнитопроводом; соединение обмоток звезда с регулированием под нагрузкой — треугольник — звезда с выведенной нейтральной точкой	
Автотрансформатор однофазный с магнитопроводом	

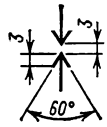
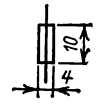
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Автотрансформатор трехфазный с магнитопроводом; соединение обмоток в звезду	
Трансформатор тока с одной вторичной обмоткой	
Трансформатор тока с одним магнитопроводом и двумя вторичными обмотками	
Трансформатор напряжения измерительный	
Трансформатор однофазный с одним магнитопроводом и управляющей обмоткой	
Усилитель магнитный с двумя рабочими и общей управляющей обмотками	
Усилитель магнитный с двумя последовательно соединенными рабочими обмотками и двумя встречно включенными секциями управляющей обмотки	
Элемент ферромагнитный, трансформатор запоминающий, элемент памяти	

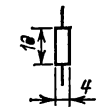
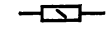
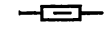
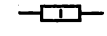
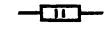
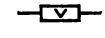
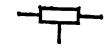
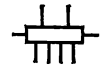
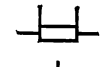
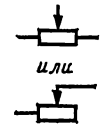
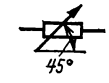
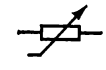
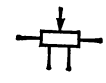
Токосъемники (по ГОСТ 2.726-68)

Наименование	Обозначение
Токосъемник троллейный:	
а) общее обозначение	
б) управляемый пантограф	
в) с третьего рельса	
Токосъемник кольцевой	
Примечание. Допускается использовать следующее обозначение	

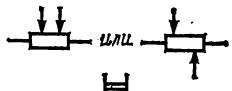
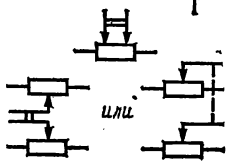
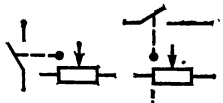
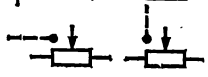
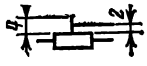
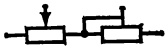
Разрядники. Предохранители (ГОСТ 2.727-68)

Наименование	Обозначение
Обозначения разрядников	
Промежуток искровой двухэлектродный защитный (размеры по ГОСТ 2.747-68). Общее обозначение	
Разрядник. Общее обозначение	
Обозначения предохранителей	
Предохранитель пробивной	
Предохранитель плавкий. Общее обозначение (размеры по ГОСТ 2.747-68)	
Предохранитель инерционно-плавкий	
Предохранитель быстродействующий	
Катушка термическая (предохранительная)	
Предохранитель с сигнализирующим устройством:	
а) с самостоятельной цепью сигнализации	
б) с общей цепью сигнализации	
Выключатель-предохранитель	
Разъединитель-предохранитель	

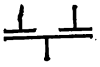
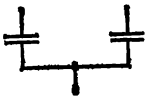
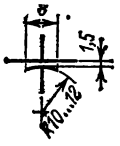
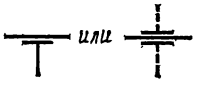
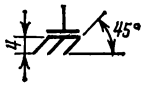
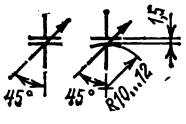
Резисторы. Конденсаторы (ГОСТ 2.728-74)

Наименование	Обозначение
Обозначение резисторов общего применения	
Резистор постоянный	
Примечание. Если необходимо указать номинальную мощность рассеяния резисторов, то для диапазона от 0,05 до 5 Вт допускается использовать следующие обозначения резисторов, номинальная мощность рассеяния которых равна:	
0,05 Вт	
0,125 Вт	
0,25 Вт	
0,5 Вт	
1 Вт	
2 Вт	
5 Вт	
Резистор постоянный с дополнительными отводами:	
а) одним симметричным	
б) одним несимметричным	
в) с двумя	
Примечание. Если резистор имеет более двух дополнительных отводов, то допускается длинную сторону обозначения увеличивать, например резистор с шестью дополнительными отводами	
Шунт измерительный	
Резистор переменный	
Резистор переменный в реостатном включении:	
а) общее обозначение	
б) нелинейное регулирование	
Резистор переменный с дополнительными отводами	

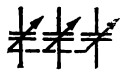
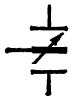
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Резистор переменный с несколькими подвижными контактами:	
а) механически не связанными	
б) механически связанными	
Резистор переменный сдвоенный	
Резистор переменный с замыкающим контактом, изображенный:	
а) совмещенно	
б) разнесенно	
Резистор подстроечный:	
а) общее обозначение	
б) в реостатном включении	
Резистор переменный с подстройкой	
Примечание. Приведенному изображению соответствует следующая эквивалентная схема	
Тензорезистор:	
а) линейный	
б) нелинейный	
Элемент нагревательный	
Терморезистор:	
а) прямого подогрева	
б) косвенного подогрева	
Варистор	
Обозначения конденсаторов	
Конденсатор постоянной емкости	

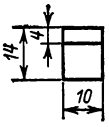
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Примечание. Для указания поляризованного конденсатора используют обозначение	
Конденсатор электрический:	
а) поляризованный	
б) неполяризованный	
Конденсатор постоянной емкости с тремя выводами (двухсекционный), изображенный:	
а) совмещенно	
б) разнесенно	
Конденсатор проходной	
Примечание. Дуга обозначает наружную обкладку конденсатора (корпус)	
Допускается использовать обозначение	
Конденсатор опорный	
Конденсатор с последовательным собственным резистором	
Конденсатор в экранирующем корпусе:	
а) с одной обкладкой, соединенной с корпусом	
б) с выводом от корпуса	
Конденсатор переменной емкости	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Конденсатор переменной емкости многосекционный, например трехсекционный	
Конденсатор подстроечный	
Конденсатор дифференциальный	
Конденсатор переменной емкости двухстаторный (в каждом положении подвижного электрода *С-С*)	
Вариконд	
Фазовращатель емкостный	
Конденсатор широкополосный	
Конденсатор помехоподавляющий	

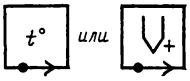
Электроизмерительные приборы (ГОСТ 2.729-68)

Наименование	Обозначение
Датчик измеряемой неэлектрической величины	
Например, датчик давления с токовым выходом	
Прибор электроизмерительный (размеры по ГОСТ 2.747-68):	
а) показывающий	
б) регистрирующий	
в) интегрирующий (например, счетчик электрической энергии)	

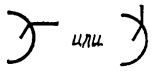
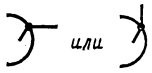
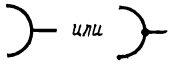
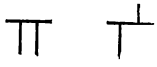
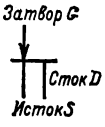
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Примечание. Для указания назначения электроизмерительного прибора в его обозначение вписывают условные графические обозначения, установленные в стандартах ЕСКД, а также буквенные обозначения единиц измерения или измеряемых величин, например:	
а) амперметр	A
б) вольтметр	V
в) вольтамперметр	VA
г) ваттметр	W
д) варметр	var
е) микроамперметр	μA
ж) милливольтметр	mV
з) омметр	Ω
и) мегаомметр	MΩ
к) частотомер	Hz
л) фазометр:	
измеряющий сдвиг фаз	φ
измеряющий коэффициент мощности	cos φ
м) счетчик ампер-часов	Ah
н) счетчик ватт-часов	Wh
о) счетчик вольт-ампер-часов реактивный	varh
п) термометр	t°
р) индикатор полярности	±
с) измеритель уровня сигнала	dB
Если необходимо указать характеристику отсчетного устройства прибора, то в его обозначение вписывают следующие графические обозначения:	
а) прибор, подвижная часть которого может отключаться в одну сторону от нулевой отметки:	
вправо	
влево	
б) прибор, подвижная часть которого может отклоняться в обе стороны от нулевой отметки	
в) прибор вибрационной системы	
г) прибор с цифровым отсчетом	
д) прибор с непрерывной регистрацией (записывающий)	
е) прибор с точечной регистрацией (записывающий)	
ж) прибор печатающий с цифровой регистрацией	
з) прибор с регистрацией перфорированием	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Например:	
вольтметр с цифровым отсчетом	
вольтметр с непрерывной регистрацией	
амперметр с отклонением стрелки в обе стороны	
Гальванометр	
Синхроноскоп	
Осциллоскоп	
Осциллограф	
Гальванометр осциллографический:	
а) тока или напряжения	
б) мгновенной мощности	
Счетчик импульсов	
Болометр полупроводниковый	
Датчик температуры	
Термопреобразователь:	
а) бесконтактный	
б) контактный	

Полупроводниковые приборы (ГОСТ 2.730-73)

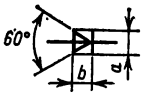
Наименование	Обозначение
Обозначения конструктивных элементов	
Корпус полупроводникового прибора	
Вывод полупроводникового прибора:	
а) электрически не соединенный с корпусом	
б) электрически соединенный с корпусом	
Вывод от корпуса	
Электроды:	
база с одним выводом	
база с двумя выводами	
p-эмиттер с *n*-областью	
n-эмиттер с *p*-областью	
несколько эмиттеров, например четыре *p*-эмиттера с *n*-областью	
коллектор с базой	
несколько коллекторов, например четыре коллектора на базе	
Области:	
область между полупроводниковыми слоями с различной электропроводностью	
исток, сток, затвор	

Затвор G
Сток D
Исток S

Примеры построения обозначений полупроводниковых диодов

Диод. Общее обозначение

a	5	6
b	4	5
d	1,5	2



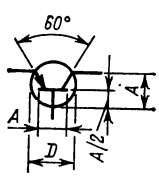
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Туннельный диод	
Обращенный диод	
Стабилитрон:	
а) односторонний	
б) двусторонний	
Варикап	
Примеры построения обозначений тиристоров	
Тиристор диодный (динистор)	
Тиристор диодный симметричный	
Тиристор триодный незапираемый с управлением по аноду (тиристор с инжектирующим управляющим электродом *p*-типа)	
Тиристор триодный незапираемый с управлением по катоду (тиристор с инжектирующим управляющим электродом *n*-типа)	
Тиристор триодный запираемый с управлением по аноду	
Тиристор триодный запираемый с управлением по катоду	
Тиристор триодный симметричный незапираемый	
Примечание. Для упрощения допускается выполнять условные графические обозначения тиристоров в зеркальном изображении	

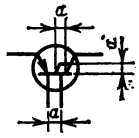
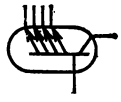
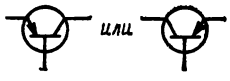
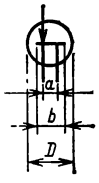
Примеры построения обозначений транзисторов с p-n переходами

Транзистор типа *p-n-p*

D	12	14
A	9	11
a	2,5	3,5



Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Транзистор типа *n-p-n* с коллектором, электрически соединенным с корпусом	
Лавинный транзистор типа *n-p-n*	
Однопереходный транзистор с *n*-базой	
Однопереходный транзистор с *p*-базой	
Транзистор типа *p-n-p* с двумя базовыми выводами	
Многоэмиттерный транзистор типа *n-p-n*	
Примечание. Для упрощения допускается: а) выполнять обозначения транзисторов в зеркальном изображении, например	
б) не изображать корпус, если смысл обозначения не меняется и корпус не используется для электрического подключения	
Примеры построения обозначений полевых транзисторов	
Полевой транзистор с каналом *n*-типа	

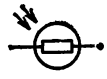
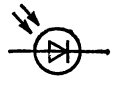
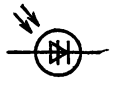
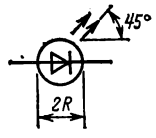
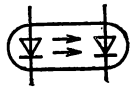
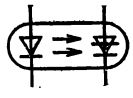
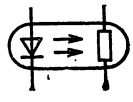
D	12	14
a	2,5	3,5
b	3	4

Полевой транзистор с каналом *p*-типа	
Полевой транзистор с изолированным затвором:	
а) обогащенного типа с *p*-каналом	
б) обогащенного типа с *n*-каналом	
в) обедненного типа с *p*-каналом	
г) обедненного типа с *n*-каналом	

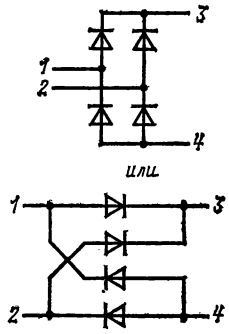
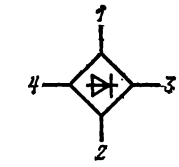
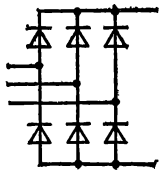
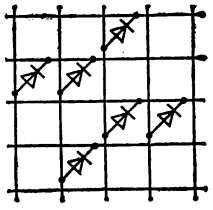
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Полевой транзистор с изолированным затвором обогащенного типа с *p*-каналом с выводом от подложки	
Полевой транзистор с изолированным затвором обогащенного типа с *n*-каналом и с внутренним соединением подложки и истока	
Полевой транзистор с двумя изолированными затворами обедненного типа с *n*-каналом и с выводом от подложки	
Примечание. Изображение окружности для полевых транзисторов является обязательным	

Примеры построения обозначений фоточувствительных излучающих и оптоэлектронных полупроводниковых приборов

Фоторезистор	
Фотодиод	
Фототиристор диодный	
Фототранзистор типа *p-n-p*	
Светоизлучающий диод (R=5 или 6 мм)	
Диодная оптопара	
Тиристорная оптопара	
Резисторная оптопара	

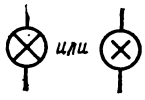
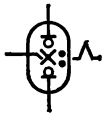
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Примеры изображения типовых схем на полупроводниковых приборах	
Однофазная мостовая выпрямительная схема:	
а) развернутое изображение	
б) упрощенное изображение	
Трехфазная мостовая выпрямительная схема	
Диодная матрица (фрагмент)	

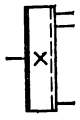
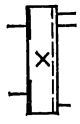
Источники света (по ГОСТ 2.732-68)

Наименование	Обозначение
Знаки, характеризующие работу приборов	
Излучение: а) видимое	
б) ультрафиолетовое	
в) инфракрасное	

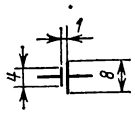
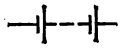
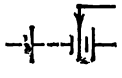
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Давление:	
а) низкое	
б) высокое	
в) сверхвысокое	
Излучение импульсное	
Примеры построения обозначений источников света	
Лампа накаливания осветительная и сигнальная. Общее обозначение Примечание. Если необходимо указать цвет лампы, допускается использовать следующие обозначения: С2 — красный С4 — желтый С5 — зеленый С6 — синий С9 — белый	
Лампа накаливания двухнитевая: а) с тремя выводами	
б) с четырьмя выводами	
Лампа газоразрядная осветительная и сигнальная. Общее обозначение	
Лампа газоразрядная низкого давления с простыми электродами: а) для работы при постоянном токе	
б) для работы при переменном токе	
Лампа газоразрядная импульсная высокого давления с комбинированными электродами и внутренним поджигом	
Лампа газоразрядная ультрафиолетового излучения низкого давления с комбинированными электродами	
Лампа накаливания инфракрасного излучения	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Лампа дуговая	
Прибор индикации электролюминесцентный некоммутируемый	
Прибор индикации электролюминесцентный коммутируемый:	
а) с односторонним управлением	
б) с двусторонним управлением	

Химические источники тока (ГОСТ 2.742-68)

Наименование	Обозначение
Элемент гальванический или аккумуляторный	
Примечание. Допускается знаки полярности не указывать.	
Батарея из гальванических элементов или аккумуляторов	
Примечание. Батарею допускается обозначать так же, как элемент. При этом над обозначением проставляют напряжение батареи	
Батарея с отводами	
Батарея с одинарным элементным коммутатором	

Элементы цифровой техники (по ГОСТ 2.743-82)

Условное графическое обозначение двоичного логического элемента имеет форму прямоугольника, который может содержать три поля: основное и два дополнительных. Дополнительные поля располагают справа и слева от основного поля. Допускается дополнительные поля разделять на зоны, которые отделяют горизонтальной чертой. В первой строке основного поля помещают обозначение функции, выполняемой элементом. В дополнительных полях — информацию о функциональных назначениях выводов (рис. 10.35).

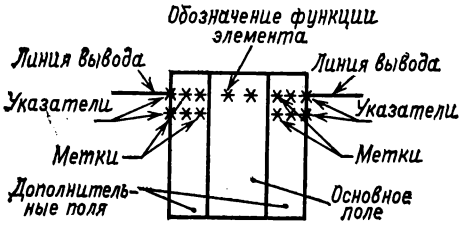


Рис. 10.35. Условное графическое обозначение двоичного логического элемента

Входы элемента изображают с левой стороны условного графического обозначения, выходы — с правой стороны.

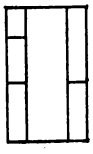
Не допускается: проводить линии выводов на уровне сторон прямоугольника; проставлять на линиях выводов стрелки, указывающие направление потоков информации.

Допускается поворачивать условное графическое обозначение на угол 90°, при этом входы располагают сверху, выходы — снизу.

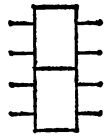
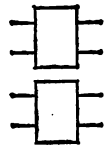
Размеры условного графического обозначения по высоте должны быть кратны $C/2$, где C не менее 5 мм. При этом расстояние между горизонтальной стороной прямоугольника и ближайшей линией вывода должно быть не менее и кратным $C/2$. Расстояние между линиями выводов должно быть не менее и кратным C.

Размеры условного графического обозначения по ширине определяются наличием дополнительных полей, количеством знаков внутри основного поля, размером шрифта. Ширина дополнительного поля, должна быть не менее 5 мм.

Начертание условных графических обозначений

Наименование	Обозначение
Основное поле	
Основное поле с дополнительными полями, разделенными на зоны Количество зон не ограничено	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Входы элемента	
Выходы элемента	
Изображение группы элементов в одной колонке:	
а) совмещено	
б) не совмещено	

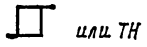
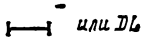
Обозначение функций

Обозначение функции или совокупности функций, выполняемых элементом, образуют из прописных букв латинского алфавита, арабских цифр и специальных знаков, записанных без пробелов. Количество знаков в обозначении функций не ограничено.

Обозначение основных функций

Наименование	Обозначение
Вычислитель	*CP*
Процессор	*P*
Память	*M*
Управление	*CO*
Перенос	*CR*
Прерывание	*INR*
Передача	*TF*
Прием	*RC*
Ввод-вывод	*IO*
Арифметика:	*A*
суммирование	*SM* или Σ
умножение	*MPL*
деление	*DIV*
вычитание	*SUB*
Логика:	*L*
логический порог	$> n$ или $\geqslant n$
мажоритарность (n из m)	$>n$
логическое ИЛИ (1 из m)	$\geqslant 1$
логическое И (n из m)	& или *И*
повторитель ($m=1$), где m — число входов логического элемента	1
n и только n	$=n$
$n=1$ — исключающее ИЛИ	$=1$
Регистр	*RG*
Счетчик	*CT*
Дешифратор	*DC*
Шифратор	*CD*
Преобразователь	*X/Y*
Сравнение	$= =$
Свертка по модулю	*Mn*
Мультиплексор	*MUX*
Демультиплексор	*DMX*

Продолжение

Наименование	Обозначение
Мультиплексор-селектор	*MS*
Селектор	*SL*
Генератор	*G*
Пороговый элемент (триггер Шмитта)	 или *TH*
Дискриминатор	или *DIC*
Триггер	*T*
Задержка	 или *DL*
Формирователь	*F*
Усилитель	▷ или ⋗
Ключ	*SW*
Модулятор	*MD*
Демодулятор	*DM*
Нелогический элемент	*

Знак * проставляют перед обозначением функции элемента, если все выводы элемента являются нелогическими.

В обозначении сложной функции символы основных функций располагают в порядке прохождения сигнала через элемент, например двоичный счетчик с дешифратором на выходе *CT2C*.

Символ функции помещают внутри основного поля в верхней его части. Если в основном поле записывают дополнительные данные, то их следует располагать ниже символа функции.

Обозначения выводов элементов

Выводы элементов подразделяются на статические и динамические, несущие и не несущие логическую информацию.

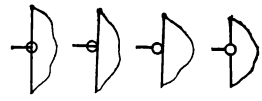
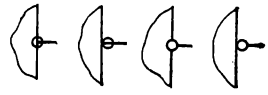
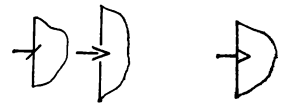
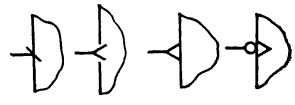
Статические и динамические выводы подразделяют на прямые и инверсные. На прямом статическом выводе двоичная переменная имеет значение 1, если сигнал на этом выводе в активном состоянии находится в состоянии «логическая 1» в принятом логическом соглашении. На инверсном статическом выводе двоичная переменная имеет значение 1, если сигнал на этом выводе в активном состоянии находится в состоянии «логический 0» в принятом логическом соглашении.

На прямом динамическом выводе двоичная переменная имеет значение 1, если сигнал на этом выводе изменяется из состояния «логический 0» в состояние «логическая 1» в принятом логическом соглашении.

На инверсном динамическом выводе двоичная переменная имеет значение 1, когда сигнал на этом выводе изменяется из состояния «логическая 1» в состояние «логический 0» в принятом логическом соглашении.

Вывод элемента должен иметь условное обозначение, состоящее из указателя и метки, проставляемой в дополнительных полях условного графического обозначения элемента.

Указатели выводов

Наименование	Обозначение	
	Форма I	Форма II
Прямой статический вход		
Прямой статический выход		
Инверсный статический вход		
Инверсный статический выход		
Прямой динамический вход		
Инверсный динамический вход		
Вывод, не несущий логической информации		

Примечание. Форма I является предпочтительной. Максимальный размер (диаметр) индикатора входа (выхода) не должен превышать 3 мм.

В качестве меток вывода допускается применять обозначения функций, приведенные выше.

Обозначения монтажной логики

Непосредственное соединение логических выходов нескольких элементов на общую нагрузку (монтажная логика) условно изображают в виде «монтажного И» или «монтажного ИЛИ». Пример изображения «монтажного И» приведен на рис. 10.36.

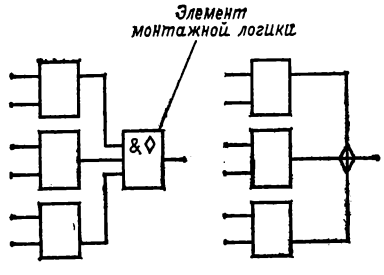


Рис. 10.36. Пример изображения «монтажного И»

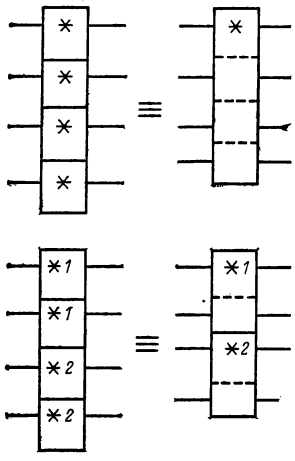


Рис. 10.37. Пример упрощенного изображения элементов

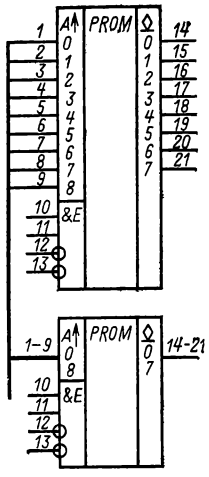


Рис. 10.38. Пример упрощенного изображения выводов элементов

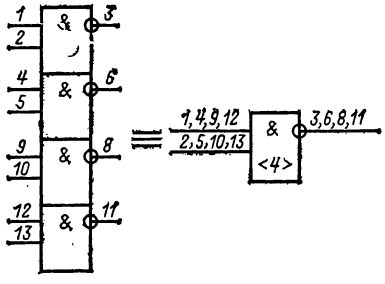


Рис. 10.39. Пример условного графического обозначения пакетов элементов

Сокращенное обозначение групп элементов

Группу элементов, изображенных совмещенно и содержащих частично или полностью одинаковую информацию в основном поле условного графического обозначения, допускается изображать упрощенно, как показано на рис. 10.37.

В схемах с повторяющимися элементами одного типа и имеющих большое число выводов одного функционального назначения допускается один элемент начертить полностью, а остальные повторить сокращенно. В зоне сокращаемой группы выводов указывают метки первого и последнего выводов, а линии связи объединяют в одну групповую линию связи (рис. 10.38).

В схемах с повторяющимися однотипными элементами, кроме метода, описанного выше, допускается применять пакетный метод сжатия информации, т. е. пакетное изображение элементов и их связей.

Краткая запись пакета информации может быть представлена следующим образом:

0,1, 0,1, 0,1, 0,1≡(0,1) 4 — последовательность 0,1 повторяется 4 раза

2, 3, 4, 5≡2÷5;

0, 0, 0, 1, 1, 1≡3 (0, 1) — каждый элемент в указанной последовательности повторяется 3 раза

1, 3, 5, 7, 9≡1, 3, ,9.

Пакетное изображение применяют при одновременном выполнении следующих условий:

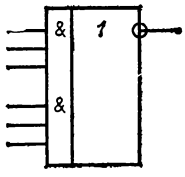
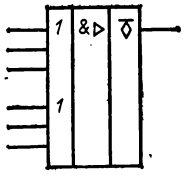
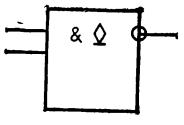
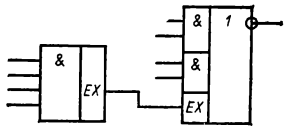
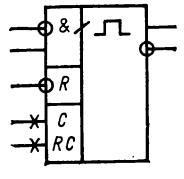
однотипность группы элементов;

однотипность входных и выходных сигналов группы элементов;

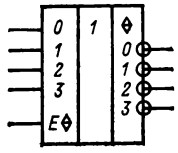
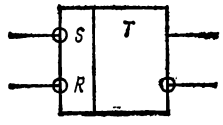
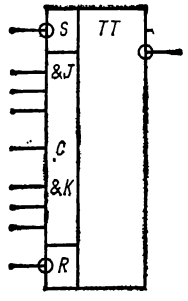
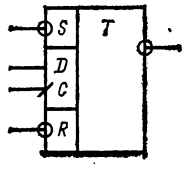
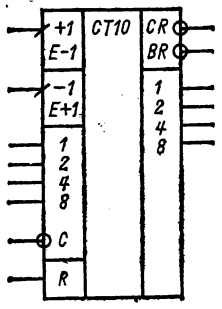
регулярность сигналов в каждом пакете, допускающая их удобное перечисление.

Пример условного графического обозначения пакетов элементов приведен на рис. 10.39.

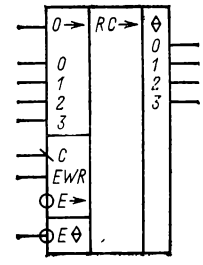
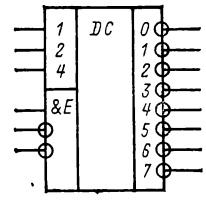
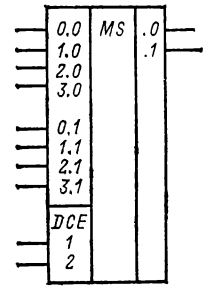
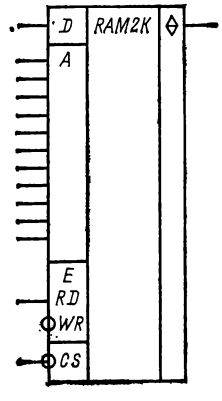
Условные графические обозначения элементов

Наименование	Обозначение
И—ИЛИ—НЕ	
ИЛИ—И с мощным открытым эмиттерным выходом (структура *n-p-n*)	
И—НЕ с открытым коллекторным выходом (структура *n-p-n*)	
Расширитель И функциональный для расширения по ИЛИ	
Одновибратор, имеющий входы «Запуск» по схеме И, вход «Сброс» и выводы для подключения времязадающих элементов *C, R*	

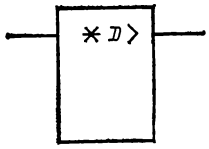
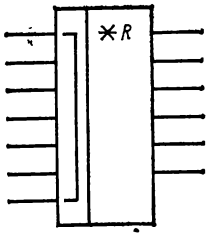
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Элемент четырехразрядный магистральный с состоянием высокого импеданса	
RS-тригер с инверсными входами	
JK-триггер двухступенчатый с установкой по инверсным входам *R* и *S*	
D-триггер с установкой по инверсным входам *R* и *S*, с динамическим входом *C*, реагирующий на изменение сигнала из состояния «логический 0» в состояние «логическая 1»	
Счетчик реверсивный четырехразрядный двоично-десятичный	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Регистр сдвига четырехразрядный, имеющий выходы с состоянием высокого сопротивления и динамический вход *C*, реагирующий на изменение сигнала из состояния «логическая 1» в состояние «логический 0»	
Дешифратор с управлением, преобразующий три разряда двоичного кода в восемь разрядов позиционного кода	
Селектор-мультиплексор двухразрядный, из четырех направлений в одно	
Устройство оперативное запоминающее, статического типа, информационная емкость *2K*	

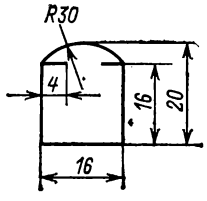
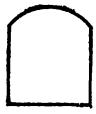
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Наборы нелогических элементов: диодов (прямая полярность)	
резисторов (часть выводов объединена)	

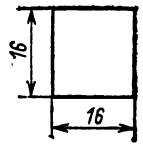
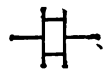
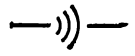
Электронагреватели, устройства и установки электротермические (по ГОСТ 2.745-68)

Расположение выводов в обозначениях электротермических установок не устанавливается и выбирается в зависимости от построения схемы. Поворот условных графических обозначений не допускается.

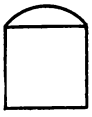
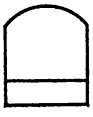
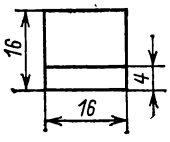
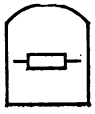
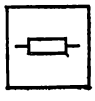
Допускается дополнение условных графических обозначений указаниями об устройствах для транспортировки садки. Допускается рядом с условными графическими обозначениями указывать рабочие параметры, например температуру, частоту, мощность.

Наименование	Обозначение
Обозначения электротермических установок и электронагревательных устройств	
Установка электротермическая. Общее обозначение	
Устройство электротермическое с камерой нагрева; промышленная электропечь	

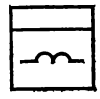
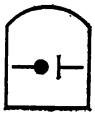
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Устройство электротермическое без камеры нагрева; электронагреватель	
Обозначения методов нагрева	
Дуговой	
Плазменный	
Электронный	
Сопротивлением	
Смешанный (дуговой и сопротивлением)	
Индукционный	
Индукционный током повышенной частоты	
В высокочастотном поле конденсатора (диэлектрический)	
Инфракрасный	
Ультразвуковой	
Режим нагрева непрерывный	
Признак устройства (установки), предназначенного для плавки	

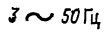
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Обозначение среды камеры нагрева	
Среда твердая	
Среда жидкая	
Атмосфера: а) искусственная	
б) защитная	
Вакуум	
Обозначения электронагревательных устройств с различными способами нагрева	
Электропечь промышленная прямого нагрева	
Электропечь промышленная косвенного нагрева	
Электронагреватель прямого нагрева	
Электронагреватель косвенного нагрева	
Примеры обозначений промышленных электропечей и электронагревателей	
Электропечь сопротивления. Общее обозначение	
Электронагреватель сопротивления. Общее обозначение	
Электропечь электродная. Общее обозначение	
Электропечь дуговая. Общее обозначение	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Электропечь дуговая трехфазная прямого нагрева с перемешивающей катушкой	
Электронагреватель индукционный. Общее обозначение	
Электронагреватель индукционный прямого нагрева	
Электропечь индукционная. Общее обозначение	
Электропечь индукционная прямого нагрева с указанием рабочих параметров	
Электропечь диэлектрическая. Общее обозначение	
Электропечь инфракрасного нагрева. Общее обозначение	
Электропечь электронного нагрева. Общее обозначение	
Электропечь плазменная с искусственной атмосферой	
Электронагреватель ультразвуковой	

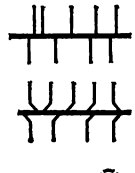
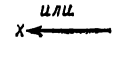
Род тока и напряжения, виды соединения обмоток, формы импульсов (ГОСТ 2.750-68)

Наименование	Обозначение
Обозначения рода тока и напряжения	
Ток постоянный	
Ток переменный. Общее обозначение	
Примечания: 1. Для указания диапазона частот используют следующие обозначения:	
а) наименьшие частоты	
б) средние частоты	
в) наибольшие частоты	
2. Допускается использовать общее обозначение переменного тока с указанием частоты, например ток переменный частотой 10 кГц	
Ток пульсирующий	
Ток постоянный и переменный (обозначение используется для устройств, пригодных для работы на постоянном и переменном токе)	
Ток переменный с числом фаз m и частотой f	
Например, ток переменный трехфазный 50 Гц	
Ток переменный с числом фаз m, частотой f и напряжением U	
Полярность отрицательная	
Полярность положительная	
Обозначения видов соединения обмоток	
Соединение обмоток двух фаз в открытый треугольник	
Обмотка трехпроводная двухфазная	
Обмотка четырехпроводная двухфазная	
Обмотка трехфазная, соединенная в звезду	
Обмотка трехфазная, соединенная в звезду с выведенной нейтралью	
Обмотка трехфазная, соединенная в треугольник	
Обмотка трехфазная, соединенная в зигзаг	
Обмотка шестифазная, соединенная в многоугольник	
Обмотка шестифазная, соединенная в звезду	
Обмотка шестифазная, соединенная в две обратные звезды	
Обмотка шестифазная, соединенная в два треугольника	
Обмотка шестифазная, соединенная в двойной зигзаг	

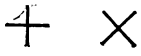
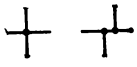
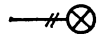
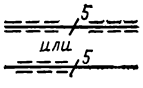
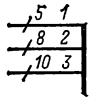
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Обозначения наиболее часто встречающихся импульсов	
Импульс высокой частоты (радиоимпульс)	
Импульс прямоугольный положительный	
Импульс прямоугольный отрицательный	
Импульс остроугольный положительный	
Импульс остроугольный отрицательный	
Перепад напряжения	
Импульс пилообразный	
Импульс трапецеидальный	
Импульс с крутым фронтом	
Импульс с крутым спадом	

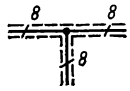
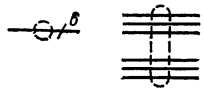
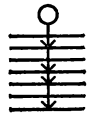
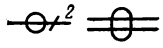
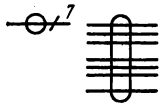
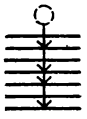
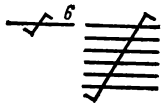
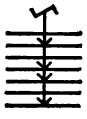
Линии электрической связи, провода, кабели и шины (ГОСТ 2.751-73)

Наименование	Обозначение
Общие обозначения линий электрической связи, проводов, кабелей и шин	
Линия электрической связи. Провод, кабель, шина	
Линия групповой связи	
Графическое слияние линий электрической связи в линию групповой связи	
Экранирование группы линий электрической связи	
Линия электрической связи экранированная	
Обрыв линии электрической связи	
Примечание. На месте знака x указывают необходимые данные о продолжении линии на схеме	
Заземление	
Корпус (машины, аппарата, прибора)	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Излом линии электрической связи:	
а) под углом 90°	
б) под углом 135°	
Графическое пересечение двух линий электрической связи, электрически не соединенных. Линии должны пересекаться под углом 90°	
Линии электрической связи с ответвлениями:	
а) одним	
б) двумя	
Группа линий электрической связи, имеющих общее функциональное назначение:	
а) однолинейное	
б) многолинейное	
Примечания: 1. В однолинейных обозначениях *n* должно быть заменено числом, указывающим количество линий в группе 2. В однолинейных обозначениях элементов или устройств, содержащих группы линий, допускается применять следующие обозначения: а) группы из двух линий б) группы из трех линий	
Например, лампа накаливания	
Переход группы линий электрической связи, имеющих общее функциональное назначение, от многолинейного обозначения к однолинейному	
Группа линий электрической связи, имеющих общее функциональное назначение, каждая из которых экранирована	
Графическое слияние трех групп, условно обозначенных номерами 1, 2 и 3 и содержащих соответственно пять, восемь и десять линий электрической связи	
Восемь линий электрической связи, каждая из которых имеет ответвление	

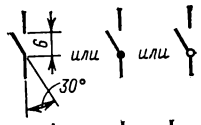
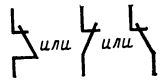
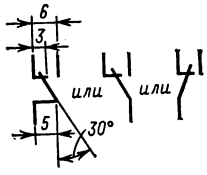
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Восемь линий электрической связи, каждая из которых экранирована и имеет ответвления	
	Однолинейное / Многолинейное
Группа линий электрической связи в общем экране	
Группа линий электрической связи, четыре из которых находятся в общем экране	
	Однолинейное / Многолинейное
Линия электрической связи, осуществленная двухжильным кабелем	
Группа линий электрической связи, осуществленная многожильным кабелем	
	Однолинейное / Многолинейное
Группа линий электрической связи, четыре из которых осуществлены многожильным кабелем	
Группа линий электрической связи, осуществленная скрученными проводами	
Группа линий электрической связи, четыре из которых осуществлены скрученными проводами	
Линия электрической связи, осуществленная гибким проводом	

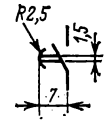
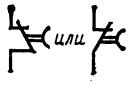
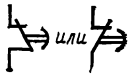
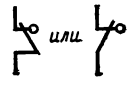
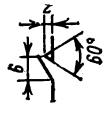
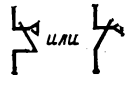
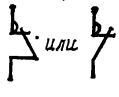
Коммутационные устройства и контактные соединения (по ГОСТ 2.755-74)

Коммутационные устройства на схемах должны изображаться в положении, принятом за начальное. При этом направление движения подвижных контактов из начального положения к конечному не устанавливается.

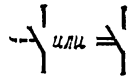
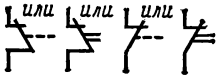
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Обозначение контактов коммутационных устройств	
Контакт коммутационного устройства. Общее обозначение:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	
в) переключающий	
Примечание. Варианты, приведенные в пп. «а», «б» и «в», распространяются на все соответствующие условные графические обозначения	
г) переключающий без размыкания цепи	
д) переключающий со средним положением	
е) с двойным замыканием	
ж) с двойным размыканием	
Контакт в контактной группе, срабатывающий раньше по отношению к другим контактам группы:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	
Контакт в контактной группе, срабатывающий позже по отношению к другим контактам группы:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	

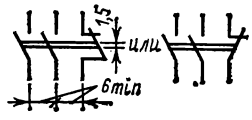
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Контакт замыкающий с замедлителем, действующим:	
а) при срабатывании	
б) при возврате	
в) при срабатывании и возврате	
Контакт размыкающий с замедлителем, действующим:	
а) при срабатывании	
б) при возврате	
в) при срабатывании и возврате	
Примечание. Обозначение замедлителя допускается изображать с противоположной стороны	
Контакт без самовозврата:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	
Контакт с самовозвратом:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	
Контакт для коммутации сильноточной цепи:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	

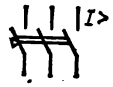
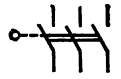
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
в) замыкающий дугогасительный	
г) размыкающий дугогасительный	
Контакт разъединителя	
Контакт выключателя-разъединителя	
Контакт с автоматическим возвратом при перегрузке	
Контакт с механической связью:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	
Контакт, чувствительный к температуре (термоконтакт)	
а) замыкающий	
б) размыкающий	
Контакт электротеплового реле при разнесенном способе изображения реле	

Примеры построения обозначений двухпозиционных коммутационных устройств

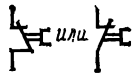
Выключатель трехполюсный	
Выключатель трехполюсный с двумя замыкающими и одним размыкающим контактом	
Выключатель двухполюсный, замыкающий одну цепь раньше размыкания другой	
Выключатель трехполюсный с автоматическим возвратом	

Продолжение табл.

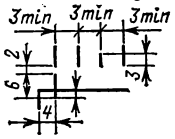
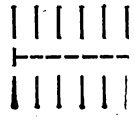
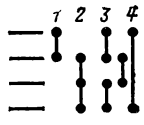
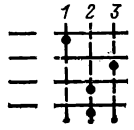
Наименование	Обозначение
Примечание. При необходимости указания величины, при изменении которой происходит возврат, используют следующие знаки:	
а) максимального тока	$I>$
б) минимального тока	$I<$
в) обратного тока	$I\leftarrow$
г) максимального напряжения	$U>$
д) минимального напряжения	$U<$
е) максимальной температуры	$T°>$
Знаки проставляют около обозначения выключателя, например:	
выключатель трехполюсный автоматический максимального тока	
Выключатель высокого напряжения*	
Отделитель*	
Короткозамыкатель*	
Выключатель путевой:	
а) однополюсный	
б) многополюсный, например трехполюсный	
Разъединитель трехполюсный	
Переключатель многополюсный, например трехполюсный	
Выключатель кнопочный нажимной:	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	

* Указания методические межотраслевые (УММ) по применению государственных стандартов ЕСКД в электрических схемах комплектных устройств и в схемах технологического контроля и автоматики энергетических объектов, 1977 г.

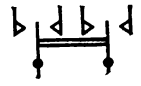
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Выключатель кнопочный вытяжной:	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	
Выключатель кнопочный поворотный:	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	
Выключатель кнопочный без самовозврата:	
а) нажимной с возвратом посредством вытягивания кнопки	
б) нажимной с возвратом посредством вторичного нажатия кнопки	

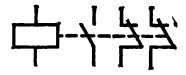
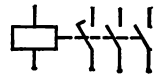
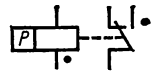
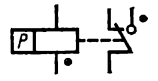
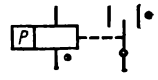
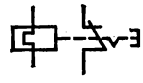
Примеры построения обозначений многопозиционных коммутационных устройств

Переключатель однополюсный многопозиционный, например четырехпозиционный	
Переключатель многопозиционный независимых цепей, например шести цепей	
Переключатели со сложной коммутацией изображают на схеме одним из следующих способов:	
первый способ: переключатель изображают в виде условного обозначения, а на поле схемы помещают таблицу замыкания контактов	
второй способ	
третий способ	

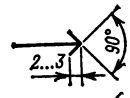
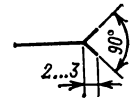
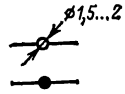
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Переключатель двухполюсный 3-позиционный с нейтральным положением	
Переключатель двухполюсный 3-позиционный с самовозвратом в нейтральное положение	

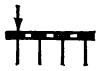
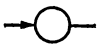
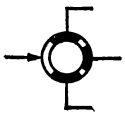
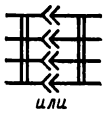
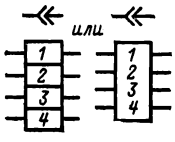
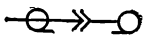
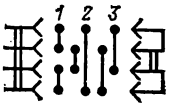
Примеры построения обозначений реле

Реле электрическое с замыкающим, размыкающим и переключающими контактами	
Реле электрическое с замыкающими контактами, один из которых срабатывает раньше другого	
Реле поляризованное:	
а) на одно направление тока в обмотке с самовозвратом	
б) на одно направление тока в обмотке без самовозврата	
в) на оба направления тока в обмотке с нейтральным положением	
Примечание. Контакт, отмеченный точкой, замыкается при приложении напряжения постоянного тока, положительный полюс которого подан к выводу, отмеченному точкой	
Реле электротепловое без самовозврата (с возвратом нажатием кнопки)	

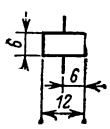
Обозначение контактов контактных соединений

Контакт контактного соединения:	
а) разъемного соединения:	
штырь	
гнездо	
б) разборного соединения	
в) неразборного соединения	

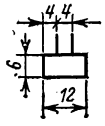
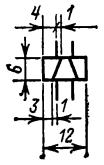
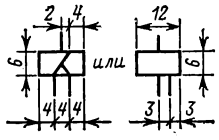
Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Контакт скользящий:	
а) по линейной токопроводящей поверхности	
б) по нескольким линейным токопроводящим поверхностям	
в) по кольцевой токопроводящей поверхности	
г) по нескольким кольцевым токопроводящим поверхностям	
Примеры построения контактных соединений	
	
Соединение контактное разъемное четырехпроводное	
Соединение контактное разъемное коаксиальное (высокочастотное)	
Перемычка контактная	
Перемычка коммутационная:	
а) на размыкание	
б) с выведенным гнездом	
в) на переключение	
Вставка-переключатель	

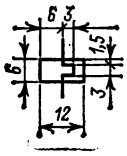
Воспринимающая часть электромеханических устройств (ГОСТ 2.756-76)

Наименование	Обозначение
Катушка электромеханического устройства	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Примечание. Выводы допускается изображать с одной стороны прямоугольника	
Катушка электромеханического устройства с двумя обмотками	
Катушка электромеханического устройства с *n* обмотками	
Катушка электромеханического устройства с двумя встречными обмотками	
Катушка электромеханического устройства с одним отводом	
Катушка электромеханического устройства трехфазного тока	
Катушка электромеханического устройства с указанием вида обмотки:	
а) обмотка напряжения	
б) обмотка максимального тока	
Катушка поляризованного электромеханического устройства	
Катушка электромеханического устройства, обладающего остаточным намагничиванием	
Катушка электромеханического устройства, имеющего механическую блокировку	
Катушка электромеханического устройства, работающего с ускорением при срабатывании	
Катушка электромеханического устройства, работающего с ускорением при срабатывании и отпускании	
Катушка электромеханического устройства, работающего с замедлением при срабатывании	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Катушка электромеханического устройства, работающего с замедлением при отпускании	
Воспринимающая часть электротеплового реле	

Элементы аналоговой техники (по ГОСТ 2.759-82)

Построение условных графических обозначений аналоговых элементов должно соответствовать ГОСТ 2.743-82 (см. выше).

Аналоговый сигнал обозначается символом Ω или Λ, цифровой #.

Обозначения основных меток выводов

Наименование	Обозначение
Начальное значение интегрирования	*I*
Установка начального значения	*S*
Установка в состояние 0	*R*
Установка в исходное состояние (сброс)	*SR*
Поддержание текущей величины сигнала	*H*
Строб, такт	*C*
Пуск	*S*
Балансировка (коррекция 0)	*NC*
Коррекция частотная	*FC*
Питание от источника напряжения	*U*
Общий вывод	*OV*

Указанные обозначения могут быть применены для указания аналогового и цифрового сигнала или элемента. При этом для указания элементов обозначения помещают после символа функции, для указания сигнала — после обозначения или характеристики сигнала.

Обозначение функций

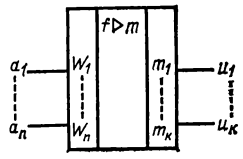
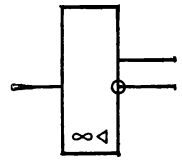
Наименование	Обозначение
Общее обозначение функции	*F(X1, X2, ..., XN)* или $f(x_1, x_2, ..., x_n)$
Выбор максимальной переменной	*MAX* или *max*
Выбор минимальной переменной	*MIN* или *min*
Генерирование	*G*
Детектирование	*DK*
Деление	*X : Y* или *x : y*
Деление частоты	*:FR* или *:fr*
Дифференцирование	*D/DT* или *d/dt*
Зона нечувствительности	
Извлечение корня	*X*↑0,5 или *X* Δ0,5 или $\sqrt{x}$
Интегрирование	*INT* или $\int$

Продолжение табл.

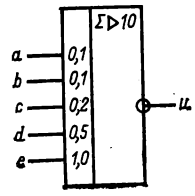
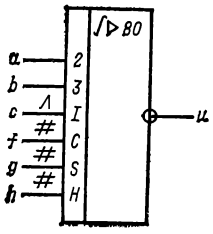
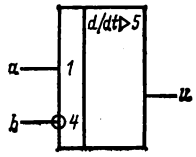
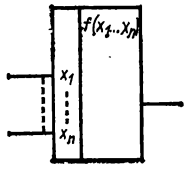
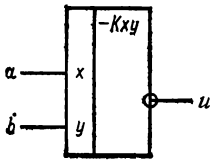
Наименование	Обозначение
Насыщение	
Логарифмирование	LOG или log
Образование модуля	|X| или |x|
Переключение, коммутирование	*SW*
Показательная функция	*X*↑*Y* или *X* Λ *Y*, или x^y
Пороговый элемент	*TH* или или
Преобразование	*X/Y* или *x/y*
Сравнение	= ≠
Суммирование	*SM* или Σ
Тригонометрические функции, например синус	SIN или sin
Умножение	*XY* или *xy*
Умножение — деление	*XY* : *Z* или *xy* : *z*
Экспонента	EXP или exp
Блок постоянного запаздывания	или *DL*
Блок переменного запаздывания	или *DLV*
Воспроизведение коэффициента	*K*
Многофункциональное преобразование	*MF*
Фильтрация	*FF*
Формирование	*F*
Усиление	> или ▷
Преобразование цифро-аналоговое	#/ Λ
Преобразование аналого-цифровое	Λ/#
Запоминание аналоговой величины (элемент слежения и хранения)	$M\Omega$ или $M\Delta$

Обозначения функций указывают в основном поле условного графического обозначения.

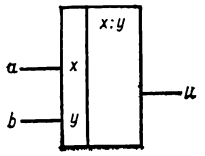
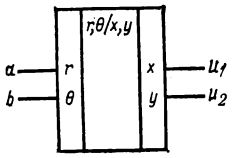
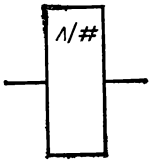
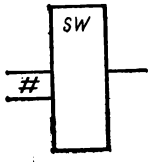
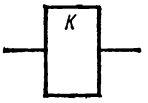
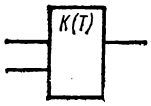
Примеры обозначения аналоговых элементов

Наименование	Обозначение
Усилитель. Общее обозначение *f* — символ функции; *m* — коэффициент усиления; m_1 до m_k — коэффициенты усиления; W_1 до W_n — весовые коэффициенты; $u_i = m m_i \times \times f(W_1 \cdot a_1, W_2 \cdot a_2, ..., W_n \cdot a_n)$, где $i = 1, 2, ..., k$; mW_i — коэффициенты передачи по *i*-му входу	
Усилитель операционный	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Усилитель суммирующий $u=-10(0{,}1a+0{,}1b+0{,}2c+0{,}5d+1{,}0e)=-(a+b+2c+5d+10e)$	
Усилитель интегрирующий Если $f=1$, $g=0$; $h=0$, то $u=-80[c\|_{t=0}+\int(2a+3b)dt]$	
Усилитель дифференцирующий $u=5\frac{d}{di}(a+4b)$	
Функциональный преобразователь. Общее обозначение $x_1, \ldots, x_n$ — аргументы функции	
Перемножитель $u=-Kab$	

Продолжение табл.

Наименование	Обозначение
Делитель $u=a/b$	
Преобразователь координат полярных в прямоугольные	
Преобразователь аналого-цифровой	
Электронные ключи, коммутаторы. Общее обозначение	
Блоки коэффициентов	
Блок постоянного коэффициента с одним входом	
K — коэффициент передачи	
Блок переменного коэффициента	
Допускается рядом с обозначением коэффициента проставлять его значение	

10.6. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ДИАГРАММ

Правила оформления диаграмм, изображающих функциональную зависимость двух или более переменных величин в системе координат, устанавливает ГОСТ 2.319-81 (СТ СЭВ 2824-80).

Диаграммы следует выполнять линиями по ГОСТ 2.303-68 (СТ СЭВ 1178-78).

Оси координат, оси шкал, ограничивающие поле диаграммы, следует выполнять

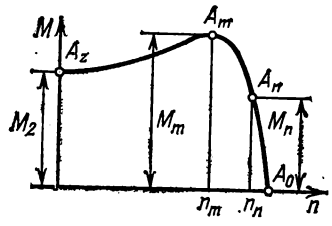


Рис. 10.40. Оформление информационной диаграммы

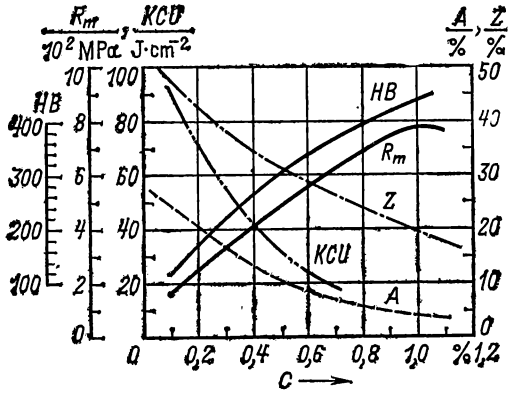


Рис. 10.41. Использование линий различных типов для изображения функциональных зависимостей

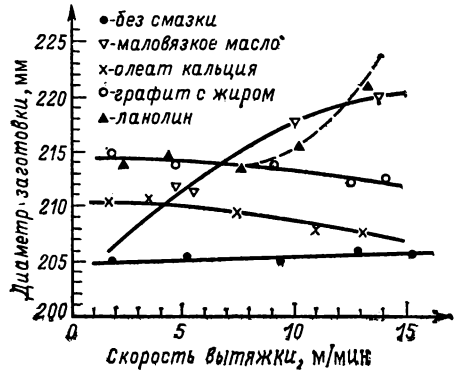


Рис. 10.42. График, построенный по точкам, полученным путем измерения или расчетов

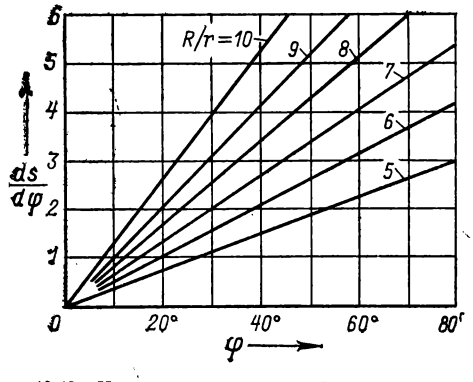


Рис. 10.43. Нанесение пучка линий, выходящих из одной точки

сплошной толстой линией (рис. 10.40—10.43). Линии координатной сетки и делительные штрихи следует выполнять сплошной тонкой линией.

Функциональные зависимости предпочтительно выполнять сплошной линией. Толщина линии определяется требуемой точностью отсчета. При изображении двух и более функциональных зависимостей на одной диаграмме допускается использовать линии различных типов (сплошную, штриховую и т. д.) (см. рис. 10.4).

Если в определенной области совпадают две и более линии, следует вычерчивать одну из них (рис. 10.42).

Характерные точки линий функциональной зависимости (т. е. обозначенные числами, буквами, символами и т. п.) допускается изображать кружком (рис. 10.40).

Точки, полученные путем измерения или расчетов, допускается обозначать графически, например кружком, крестиком и т. п. (рис. 10.42). Обозначения точек должны быть разъяснены в пояснительной части диаграммы.

Координатные оси как шкалы значений изображаемых величин должны быть разделены на графические интервалы одним из следующих способов: а) координатной сеткой (рис. 10.43); б) делительными штрихами (рис. 10.42); в) сочетанием координатной сетки и делительных штрихов (рис. 10.41).

Диаграммы для информационного изображения зависимостей допускается выполнять без шкал значений величин (рис. 10.40).

Числа у шкал следует размещать вне поля диаграммы и располагать горизонтально.

Величины, связанные функциональной зависимостью, следует указывать одним из следующих способов:

а) символом (рис. 10.40, 10.41);

б) наименованием (рис. 10.42);

в) математическим выражением функциональной зависимости (рис. 10.43).

Обозначение величины (символ) размещается у середины шкалы с ее внешней стороны, а при объединении символа с единицей измерения в виде дроби — в конце шкалы (рис. 10.41). В диаграмме без шкал обозначение величины следует размещать вблизи стрелки, которой заканчивается ось.

Единицы измерения наносят: а) в конце шкалы между последним и предпоследним числами шкалы; б) вместе с обозначением переменной величины после запятой; в) в конце шкалы после последнего числа в виде дроби, в числителе которой обозначение величины, а в знаменателе — единица измерения.

Пересечение надписей и линий на диаграмме не допускается. При недостатке места следует прерывать линию.

10.7. ПЕРЕЧЕНЬ ГОСТ И СТ СЭВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КОНСТРУКТОРСКИХ ДОКУМЕНТОВ

Приведены обозначения и наименования наиболее употребительных стандартов Единой системы конструкторской документации. Перечень составлен по данным указателя «Государственные стандарты СССР», т. 3. (М.: Издательство стандартов, 1984).

Продолжение табл.

ГОСТ ЕСКД	СТ СЭВ	Наименование
2.001-70		Общие положения
2.101-68	364-76	Виды изделий
2.102-68		Виды и комплектность конструкторских документов
2.103-68	208-75	Стадии разработки
2.104-68	140-74, 365-76	Основные надписи
2.105-79	2667-80	Общие требования к текстовым документам
2.106-68		Текстовые документы
2.108-68	2516-80	Спецификация
2.109-73	858-78, 1182-78	Основные требования к чертежам
2.113-75	1179-78	Групповые и базовые конструкторские документы
2.114-70		Технические условия. Правила построения, изложения и оформления
2.115-70		Технические условия. Порядок согласования, утверждения и государственной регистрации
2.118-73		Техническое предложение
2.119-73		Эскизный проект
2.120-73		Технический проект
2.201-80		Обозначение изделий и конструкторских документов
Общие правила выполнения чертежей		
2.301-68	1181-78	Форматы
2.302-68	1180-78	Масштабы
2.303-68	1178-78	Линии
2.304-81	851-78, 855-78	Шрифты чертежные
2.305-68		Изображения — виды, разрезы, сечения
2.306-68	860-78	Обозначения графические материалов и правила их нанесения на чертежах
2.307-68	1976-79 2180-80	Нанесение размеров и предельных отклонений
2.308-79	368-76	Указания на чертежах допусков форм и расположения поверхностей
2.309-73	1632-79	Обозначение шероховатости поверхностей
2.310-68	367-76	Нанесение на чертежах обозначений покрытий, термической и других видов обработки
2.311-68	284-76	Изображение резьбы
2.312-72		Условные изображения и обозначения швов сварных соединений
2.313-82	138-81	Условные изображения и обозначения неразъемных соединений
2.314-68	648-77	Указания на чертежах о маркировании и клеймении изделий
2.315-68	1978-79	Изображения упрощенные и условные крепежных деталей
2.316-68	856-78	Правила нанесения на чертежах надписей, технических требований и таблиц
2.317-69	1979-79	Аксонометрические проекции
2.318-81	1977-79	Правила упрощенного нанесения размеров отверстий
2.319-81	2824-80	Правила выполнения диаграмм
Правила выполнения чертежей различных изделий		
2.410-68	209-75, 366-76	Правила выполнения чертежей металлических конструкций
2.413-72		Правила выполнения конструкторской документации изделий, изготавливаемых с применением электрического монтажа
2.414-75	649-77	Правила выполнения чертежей жгутов, кабелей и проводов
2.415-68	1184-78	Правила выполнения чертежей изделий с электрическими обмотками
2.416-68		Условные изображения сердечников магнитопроводов
2.417-78	1186-78	Правила выполнения чертежей печатных плат
Правила выполнения схем		
2.701-76	651-77	Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению
2.702-75	1188-78	Правила выполнения электрических схем
2.703-68	1187-78	Правила выполнения кинематических схем
2.704-76	1981-79	Правила выполнения гидравлических и пневматических схем
2.705-70		Правила выполнения электрических схем обмоток и изделий с обмотками
2.708-81	1982-79	Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники
2.709-72	3754-82	Система маркировки цепей в электрических схемах
2.710-81	2182-80	Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах
Обозначения условные графические в схемах		
2.721-74		Обозначения общего применения
2.722-68		Машины электрические
2.723-68	869-78	Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители
2.725-68		Устройства коммутирующие
2.726-68		Токосъемники
2.727-68	862-78	Разрядники, предохранители
2.728-74	863-78, 864-78	Резисторы, конденсаторы
2.729-68	2830-80	Приборы электроизмерительные
2.730-73	661-77	Приборы полупроводниковые
2.731-81	865-78	Приборы электровакуумные
2.732-68	866-78	Источники света
2.733-68	660-77	Обозначения условные графические детекторов ионизирующих излучений в схемах
2.734-68		Линии сверхвысокой частоты и их элементы
2.735-68	652-77	Антенны
2.736-68		Элементы пьезоэлектрические и магнитострикционные. Линии задержки
2.737-68	141-74, 2831-80	Устройства связи
2.741-68	868-78, 1983-79	Приборы акустические
2.742-68	653-77	Источники тока электрохимические
2.743-82		Элементы цифровой техники
2.744-68		Устройства электрозапальные
2.745-68	656-77	Электронагреватели, устройства и установки электротермические
2.746-68	654-77	Генераторы и усилители квантовые
2.747-68		Размеры условных графических обозначений
2.748-68	1634-79	Обозначения условные графические электростанций и подстанций в схемах энергоснабжения
2.750-68		Род тока и напряжения, виды соединения обмоток, форма импульсов
2.751-73		Электрические связи, провода, кабели и шины
2.752-71		Устройства телемеханики
2.753-79		Проводные средства связи ЕАСС

Продолжение табл.

ГОСТ ЕСКД	СТ СЭВ	Наименование
2.754-72	3217-81	Обозначения условные графические электрического оборудования и проводок на планах
2.755-74		Устройства коммутационные и контактные соединения
2.756-76	712-77	Воспринимающая часть электромеханических устройств
2.758-81	1983-79	Сигнальная техника
2.759-82	3336-81	Элементы аналоговой техники
2.770-68	2519-80	Элементы кинематики
2.784-70		Элементы трубопроводов
2.796-81	2181-80	Элементы вакуумных систем
2.797-81	2517-80	Правила выполнения вакуумных схем

Раздел 11

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НОВОЙ ТЕХНИКИ

СОДЕРЖАНИЕ

11.1. Общие положения по определению экономической эффективности новых электроизделий 340
Место и роль расчетов экономической эффективности при разработке новых электроизделий (340). Определение годового экономического эффекта (341). Выбор базы для сравнения вариантов и условия сопоставимости (341). Учет фактора времени (342).
11.2. Определение затрат по изготовлению и эксплуатации электроизделий . . . 342
Состав капитальных вложений и текущих затрат на изготовление новых электроизделий (342). Себестоимость изготовления электроизделия (343). Определение затрат по эксплуатации электроизделий (346).
11.3. Определение цен на новые электроизделия, надбавок и скидок 347
Определение лимитной цены на новое изделие (347). Определение оптовой цены на новое изделие (348). Расчет надбавки к цене на новое изделие (348).
11.4. Комплексный анализ эффективности новых электроизделий 350
Технико-экономические показатели сравниваемых вариантов электроизделий (350). Пример определения годового экономического эффекта от внедрения в народное хозяйство нового электродвигателя (350). Определение эффективности новых электроизделий на основе метода балльно-индексной оценки (351).
11.5. Аттестация продукции 352
11.6. Стимулирование повышения эффективности новых изделий 352
Стимулирование экономии материальных, трудовых и энергетических ресурсов при производстве и эксплуатации электроизделий (352). Порядок образования и использования фондов экономического стимулирования научных и проектных организаций (353). Единый фонд развития науки и техники (ЕФРНТ) (354).
11.7. Функционально-стоимостный анализ (ФСА) 354
Общие положения по проведению функционально-стоимостного анализа (354). Эффективность функционально-стоимостного анализа (355).
11.8. Особенности определения экономического эффекта мероприятий по совершенствованию технологии производства . . . 355
Список литературы 356

11.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВЫХ ЭЛЕКТРОИЗДЕЛИЙ

Место и роль расчетов экономической эффективности при разработке новых электроизделий

Органической составной частью всего комплекса работ по созданию новых электроизделий является расчет и анализ их эффективности.

Определение эффективности новых электроизделий осуществляется на основе единых методических принципов, сформулированных в методике (основных положениях) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений, утвержденной постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике, Госпланом СССР, Академией наук СССР и Государственным комитетом Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий от 14 февраля 1977 г. № 48/16/13/3.

Согласно данной методике к новой технике относятся результаты научных исследований и прикладных разработок, содержащие изобретения и другие научно-технические достижения, а также новые и усовершенствованные технологические процессы производства, орудия и предметы труда, способы организации производства и труда, обеспечивающие при их использовании повышение технико-экономических показателей производства или решение социальных и других задач развития народного хозяйства.

Эффективность нового изделия или нового технологического процесса определяется на основе совокупного учета экономической эффективности (экономии народнохозяйственных затрат), социальной эффективности (улучшение и оздоровление условий труда, повышение уровня механизации и автоматизации производства, гигиеничность и безопасность новой техники при ее изготовлении и в эксплуатации и т. д.), экологической эффективности (влияние

новой техники на окружающую среду: уровень шума, вибрации, вредные выделения и т. д.), научно-технической значимости (получение авторских свидетельств, возможность патентования за рубежом, уровень качества и т. д.).

Эффективность от внедрения новых разработок определяется на основе учета всех этих четырех видов эффективности на всех стадиях «жизненного» цикла нового изделия, в состав которого входят:

разработка и освоение в производстве нового изделия;

промышленное (серийное) изготовление нового изделия;

использование нового изделия у потребителя.

Расчеты и анализ эффективности новых электроизделий производятся:

до начала разработки нового электроизделия. При этом определяется предполагаемая эффективность от использования его в народном хозяйстве. Результаты расчетов эффективности на этой стадии являются показателями целесообразности проведения работ по созданию нового изделия с установленными принципиальными положениями по его разработке и ожидаемому уровню технических показателей (мощность, потери электроэнергии, ресурс работы, надежность и т. д.);

в процессе разработки нового изделия. На основе расчетов эффективности устанавливается целесообразность принятия различных технических решений (выбор материала, типа обмотки и т. д.);

по окончании разработки нового изделия определяется ожидаемая эффективность от внедрения его в народное хозяйство. По результатам расчета ожидаемой эффективности устанавливаются целесообразность постановки нового изделия на промышленное производство, масштабы его изготовления и области целесообразного применения;

по результатам использования новых изделий у потребителей определяется фактическая эффективность, свидетельствующая о действительной народнохозяйственной экономии от внедрения новых изделий в народное хозяйство.

Определение экономической эффективности нового электроизделия осуществляется путем сравнения с соответствующими аналогами при соблюдении условий сопоставимости и учета фактора времени.

Расчет и анализ эффективности нового электроизделия осуществляется в следующей последовательности:

1) расчет годового экономического эффекта от производства и использования нового электроизделия;

2) расчет лимитной цены на новое изделие и надбавки к цене за качество;

3) комплексный анализ эффективности нового электроизделия, осуществляемый на основе учета совокупности технико-экономических показателей, а также использования в ряде случаев метода балльно-индексной оценки.

Определение годового экономического эффекта

Расчет годового экономического эффекта $Э$ от производства и использования нового электроизделия производится по следующей формуле:

$$Э = \left[З_1 \frac{B_2}{B_1} \frac{p_1 + E_н}{p_2 + E_н} + \right.$$
$$\left. + \frac{(И_1 - И_2) - E_н (K_2 - K_1)}{p^2 + E_н} - З_2 \right] A_2.$$

Здесь $З_1$, $З_2$ — приведенные затраты базового и нового электроизделий, руб. Состав и методика расчета этих затрат рассматриваются в § 11.2; B_2/B_1 — коэффициент учета роста производительности средств труда, использующего новое электроизделие по сравнению с аналогом; $(p_1+E_н)/(p_2+E_н)$ — коэффициент учета изменения срока службы нового электроизделия по сравнению с аналогом; p_1, p_2 — доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) базового и нового электроизделий ($p=1/T_{сл}$); $T_{сл}$ — срок службы электроизделия с учетом морального износа, лет; $E_н$ — нормативный коэффициент эффективности (0,15); $И_1$, $И_2$ — текущие издержки потребителя при использовании базового и нового электроизделий в расчете на объем продукции, производимый с помощью нового электроизделия, руб. Издержки по базовому варианту определяются с учетом B_2/B_1; K_1, K_2 — сопутствующие капитальные вложения у потребителя (без учета стоимости рассматриваемого электроизделия) при использовании базового и нового электроизделий в расчете на объем продукции, производимой с помощью нового электрооборудования, руб.; A_2 — годовой объем производства новых средств труда в расчетном году в натуральных единицах. За расчетный год принимается первый год серийного выпуска нового электроизделия.

В соответствии с новой методикой цен [11.3] вместо приведенных затрат по базовому изделию $З_1$ принимается действующая оптовая цена $Ц_б$, а по новому изделию $З_2$ — в зависимости от стадии, на которой определяется экономический эффект, лимитная цена $Ц_л$ или проект оптовой цены $Ц_н$. Порядок определения цен на новое изделие изложен ниже (см. § 11.3).

Выбор базы для сравнения вариантов и условия сопоставимости

За базу сравнения при определении годового экономического эффекта принимаются:

на этапе выбора варианта разработки нового электроизделия, при принятии решения о постановке на производство новой техники — показатели лучшей техники, спроектированной в СССР (или зарубежной техники, которая может быть закуплена в необходимом количестве или разработана в СССР на основе приобретения лицензии), имеющей наименьшие приведенные затраты в расчете на единицу продукции (работы), выпускаемой с помощью этой техники. В случае отсутствия проектных разработок в СССР и невозможности использования зарубежного опыта в качестве базы сравнения принимаются показатели лучшей техники, имеющейся в СССР;

на этапе принятия решения о внедрении нового электроизделия у конкретного потребителя — показатели заменяемой техники.

При расчете и анализе эффективности должна быть обеспечена сопоставимость сравниваемых вариантов по:

объему производимой с помощью новой техники продукции (работы);

качественным параметрам;

фактору времени;

социальным факторам производства и использования продукции, включая влияние на окружающую среду.

На производительность средства труда, использующего электроизделие, влияют такие показатели, как мощность электрооборудования, изменение его пусковых характеристик, плавность и диапазоны регулирования и т. д.

При определении стоимостных показателей сравниваемых конструкций должны использоваться одни и те же методы расчета, цены, тарифные ставки и другие нормативы одного уровня.

Учет фактора времени

Учет фактора времени при определении годового экономического эффекта нового электроизделия имеет место в тех случаях, когда капитальные вложения осуществляются в течение ряда лет, а также когда имеет место изменение текущих издержек по годам эксплуатации при использовании электроизделия у потребителя.

Учет фактора времени осуществляется путем приведения к началу расчетного года капитальных и текущих затрат на разработку, изготовление и использование сравниваемых электроизделий.

Такое приведение осуществляется путем умножения (деления) затрат соответствующего года на коэффициент приведения, определяемый по формуле

$$\alpha_t = (1 + E)^t,$$

где α_t — коэффициент приведения; E — норматив приведения (0,1); t — число лет, отделяющее затраты данного года от начала расчетного года.

Затраты, осуществляемые до начала расчетного года, умножаются на коэффициент приведения α_t, а после начала расчетного года делятся на этот коэффициент.

Например, разработка и освоение производства нового изделия займут 4 года, начало работ в 1981 г., первый год серийного производства — 1985 г. Стоимость работ предполагается равной 85 тыс. руб., в том числе по годам: 1981 — 10 тыс. руб.; 1982 — 15 тыс. руб.; 1983 — 40 тыс. руб.; 1984 — 20 тыс. руб.

Приведенные капитальные вложения на разработку и освоение нового изделия составят:

$$10\,(1 + 0,1)^{4-1} + 15\,(1 + 0,1)^{4-2} + 40\,(1 + 0,1)^{4-3} + 20\,(1 + 0,1)^{4-4} = 95,46 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, при расчете экономической эффективности нового изделия затраты на разработку и освоение будут учтены в сумме не 85, а 95,46 тыс. руб.

Таблица 11.1. **Коэффициенты приведения по фактору времени [рассчитанные по формуле $\alpha_t = (1+E)^t$]**

t	α_t	$1/\alpha_t$	t	α_t	$1/\alpha_t$
1	1,1000	0,9091	6	1,7716	0,5645
2	1,2100	0,8264	7	1,9487	0,5132
3	1,3310	0,7513	8	2,1436	0,4665
4	1,4641	0,6830	9	2,3579	0,4241
5	1,6105	0,6209	10	2,5937	0,3855

Учет фактора времени, следовательно, стимулирует к сокращению длительности разработки и освоения новых изделий.

Приведенные капитальные вложения используются только для оценки экономической эффективности, но не могут служить основанием для изменения сметной стоимости работ.

В табл. 11.1 приводятся значения коэффициентов приведения по фактору времени.

11.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОИЗДЕЛИЙ

Состав капитальных вложений и текущих затрат на изготовление новых электроизделий

Расходы по изготовлению сравниваемых электроизделий учитываются как приведенные затраты ($З_1$, $З_2$).

Приведенные затраты представляют собой сумму себестоимости изготовления и нормативной прибыли завода-изготовителя:

$$З = C + E_н K,$$

где $З$ — приведенные затраты при изготовлении электроизделия, руб.; C — полная себестоимость электроизделия, руб.; K — удельные (в расчете на единицу изделия) капитальные вложения в производственные фонды и другие единовременные затраты, предшествовавшие серийному изготовлению электроизделия, руб.; $E_н$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, принимаемый единым по всему народному хозяйству и равный 0,15.

В состав капитальных вложений завода-изготовителя входят стоимость его основных и оборотных фондов, а также расходы, связанные с проведением исследований, разработкой и освоением в производстве нового изделия.

В расчетах экономической эффективности допускается определение лишь той части капитальных вложений, которая претерпевает изменения в сравниваемых вариантах.

Во многих случаях в составе капитальных вложений достаточно учесть лишь следующие затраты: 1) расходы на разработку нового электроизделия $K_р$, включающие затраты на проведение необходимых исследований, стоимость проектирования, изготовления, испытания и доработки опытных образцов; 2) стоимость специального технологического оснащения (штампов, моделей, пресс-форм) $K_{сп,осн}$;

3) стоимость специального технологического оборудования $K_{сп,об}$.

Таким образом, капитальные вложения завода-изготовителя

$$K = K_р + K_{сп,осн} + K_{сп,об}.$$

Удельные капитальные вложения завода-изготовителя определяются в расчете на предполагаемый размер выпуска нового электроизделия в расчетном году A_2.

Для определения затрат на разработку нового электроизделия составляется смета, в составе которой учитываются следующие статьи:

1. Зарплата основных исполнителей с необходимыми начислениями (дополнительная зарплата, отчисления на социальное страхование и т. д.). В качестве основных исполнителей при выполнении проектных и научно-исследовательских работ привлекаются инженеры, техники, лаборанты, чертежники, рабочие и др.
2. Стоимость основных материалов, покупных, полуфабрикатов и комплектующих изделий.
3. Специальные расходы: а) специальное лабораторное оборудование; б) специальные приборы; в) макеты и образцы со стороны.
4. Амортизация лабораторного оборудования.
5. Стоимость потребляемой энергии (электроэнергии, пара, сжатого воздуха и т. д.).
6. Командировки.
7. Общие расходы.

Себестоимость изготовления электроизделия

Расчет себестоимости электроизделий C предпочтительно производить путем составления калькуляции себестоимости.

Калькуляция себестоимости электрооборудования включает в себя следующие статьи затрат:

$$C = И_м + И_{п,и} - И_{отх} + И^{осн}_{з,п} + И^{доп}_{з,п} + И_с + \\ + И_{сп,осн} + И_{с,об} + И_ц + И_{зав} + И_{вн},$$

где $И_м$ — основные материалы; $И_{п,и}$ — покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты; $И_{отх}$ — возвратные отходы (вычитаются); $И^{осн}_{з,п}$ — основная зарплата производственных рабочих; $И^{доп}_{з,п}$ — дополнительная зарплата производственных рабочих; $И_с$ — отчисления на социальное страхование; $И_{сп,осн}$ — износ специального технологического оснащения; $И_{с,об}$ — расходы на содержание и эксплуатацию оборудования; $И_ц$ — цеховые расходы; $И_{зав}$ — общезаводские расходы; $И_{вн}$ — внепроизводственные расходы.

Стоимость основных материалов

$$И_м = (1 + k_{тр}) \sum_1^r G_{чер} Ц_м,$$

где $k_{тр}$ — коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы предприятия (3—5 % стоимости материалов); r — число наименований материалов; $G_{чер}$ — черновая масса материалов, израсходованных на производство электроизделия, кг; $Ц_м$ — цена единицы материала, руб/кг. Черновая масса по

Таблица 11.2. **Расчет затрат на материалы**

Наименование основных материалов	Единица	Чистая масса	Коэффициент использования материалов	Черновая масса	Цена материала	Сумма

каждому виду материалов

$$G_{чер} = G_{чис}/k_{исп},$$

где $G_{чис}$ — чистая масса материалов, расходуемых на изделие; $k_{исп}$ — коэффициент использования материала.

Расчет затрат на материалы выполняется по форме, приведенной в табл. 11.2.

Стоимость покупных изделий

$$И_{п,и} = \sum_1^c n Ц_{п,и} (1 + k_{тр}),$$

где c — количество наименований покупных изделий; n — количество штук покупных изделий каждого наименования; $Ц_{п,и}$ — цена покупного изделия.

Стоимость отходов

$$И_{отх} = \Sigma (G_{чер} - G_{чис}) Ц_{отх},$$

где $Ц_{отх}$ — реализационная цена отходов, руб/кг.

Цены на материалы, покупные изделия, отходы имеются в соответствующих прейскурантах (Прейскурантиздат), необходимый пе-

Таблица 11.3. **Перечень прейскурантов цен**

Наименование прейскуранта	№ прейскуранта
Чугун и ферросплавы	01-03
Сталь обыкновенного качества	01-07
Качественная сталь	01-08
Цветные металлы, сплавы и порошки	02-01
Прокатно-тянутые и прессованные изделия из цветных металлов и сплавов (ч. I и II)	02-05
Химическая продукция	05-06
Изделия и детали из пластических масс	05-02
Лакокрасочные материалы	05-04
Тарифы на электрическую и тепловую энергию	09-01
Машины электрические	15-01
Аппаратура электрическая высоковольтная	15-03
Генераторы электрические	15-02
Аппаратура электрическая низковольтная	15-04
Трансформаторы, реакторы	15-05
Кабельные изделия	15-09
Электроизоляционные изделия	15-10
Электровакуумные и полупроводниковые приборы	36-07
Подшипники	21-02
Оборудование	18-01
Отходы:	
черных металлов	01-08
цветных металлов	02-05
Транспортные средства	19-14
Инструменты, измерительные приборы	18-05
Редукторы	19-08
Средства вычислительной техники	17-08

речень которых приводится в табл. 11.3. Коэффициенты использования материалов принимаются по фактическим данным предприятий, осуществляющих производство аналогичных конструкций электроизделий.

Основная зарплата производственных рабочих

$$И_{з,п}^{осн} = \sum_{i=1}^{m} t_i z_i \eta_д,$$

где m — количество видов работ по изготовлению электроизделия; t_i — трудоемкость i-го вида работ, ч; z_i — средняя часовая тарифная ставка по каждому виду работ; $\eta_д$ — коэффициент, учитывающий ряд доплат.

На стадии проектирования определение трудоемкости и зарплаты по изготовлению новой машины нередко затруднительно. Указанные затраты могут быть найдены при этом аналитическим путем на основе сравнения разрабатываемой конструкции с близкой в конструктивно-технологическом отношении существующей конструкцией. Зная трудоемкость и сложность изготовления изделия-аналога, можно установить виды работ, характер и степень изменения их объема. Например, трудоемкость изготовления выпускаемого электродвигателя составляет 15 ч. Известно, что новая конструкция отличается от существующих большей сложностью выполнения обмоточных работ и что удельный вес последних составляет 40 % всей трудоемкости. Путем анализа выполнения обмоточных работ в новой и существующей конструкциях устанавливаем степень возрастания их объема (например, на 20 %), следовательно, примерная трудоемкость изготовления нового изделия

$$\sum_{i=1}^{m} t_i = 15\,(1 + 0{,}4 \cdot 0{,}2) = 16{,}2 \text{ ч}.$$

Расчет основной зарплаты ведется по табл. 11.4.

Часовые ставки рабочих приведены в табл. 11.5 и 11.6.

Дополнительная зарплата производственных рабочих $И_{з,п}^{доп}$ включает оплату отпуска, льготных часов подростков, оплату перерывов в работе кормящих матерей, оплату времени выполнения государственных и общественных обязанностей:

$$И_{з,п}^{доп} = И_{з,п}^{осн} \eta_{доп},$$

где $\eta_{доп}$ — коэффициент, учитывающий перечисленные виды оплаты.

Начисления на социальное страхование

$$И_с = \left(И_{з,п}^{осн} + И_{з,п}^{доп}\right) \eta_с,$$

где $\eta_с$ — коэффициент отчислений на социальное страхование.

Особенностью специальных инструментов и приспособлений является то, что они изготовляются по специальным чертежам и техническим условиям только для производства данной конструкции изделия. Затраты по этой статье себестоимости определяются на основе данных о стоимости различных видов необходимого специального оснащения (штампов, моделей, пресс-форм и т. д.), норм расхода их

Таблица 11.4. **Расчет основной зарплаты производственных рабочих**

№ п/п.	Вид работ	Средний разряд	Средняя часовая ставка	Норма времени	Сумма

и количества подлежащих изготовлению изделий

$$И_{сп,осн} = \sum_{1}^{f} \frac{К_{сп,осн}}{n_{изн}},$$

где $К_{сп,осн}$ — стоимость специального оснащения каждого вида; f — количество наименований специального оснащения; $n_{изн}$ — срок службы данного вида оснащения до полного износа.

Когда

$$n_{изн} > n_к,$$

где $n_к$ — количество изделий данной конструкции, подлежащих выпуску с помощью данного вида спецоснащения,

$$И_{сп,осн} = К_{сп,осн}/n_к.$$

Таблица 11.5. **Часовые тарифные ставки рабочих (в копейках)**

Условия труда	Разряд					
	1	2	3	4	5	6
На работах с нормальными условиями труда.						
для сдельщиков	44,7	48,7	53,9	59,6	67,0	76,7
для повременщиков	41,8	45,5	50,8	55,7	62,7	71,7
На работах с тяжелыми и вредными условиями труда:						
для сдельщиков	50,3	54,8	60,6	67,0	75,4	86,3
для повременщиков	47,1	51,2	56,6	62,7	70,5	80,7
На работах с особо тяжелыми и особо вредными условиями труда:						
для сдельщиков	55,7	60,6	67,0	74,2	83,5	95,5
для повременщиков	52,1	56,6	62,7	69,3	78,0	89,3

Таблица 11.6. **Часовые тарифные ставки для рабочих, занятых на станочных работах в машиностроительной промышленности (в копейках)**

Условия труда	Разряд					
	1	2	3	4	5	6
На работах с нормальными условиями труда:						
для сдельщиков	50,3	54,8	60,6	67,0	75,4	86,3
для повременщиков	47,1	51,2	56,6	62,7	70,5	80,7
На работах с вредными условиями труда:						
для сдельщиков	53,0	57,6	63,7	70,5	79,4	90,8
для повременщиков	49,5	53,9	59,6	65,9	74,2	84,9

Стоимость специального оснащения должна быть погашена в срок не более двух лет.

На статью «Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования» относятся затраты на содержание, амортизацию и текущий ремонт производственного и подъемно-транспортного оборудования, цехового транспорта, а также затраты на использование быстроизнашивающихся инструментов и приспособлений и другие расходы:

$$И_{с,об} = \Sigma И_{м,ч} t,$$

где $И_{м,ч}$ — стоимость одного машино-часа работы соответствующего оборудования; t — трудоемкость изготовления изделия на данном оборудовании, ч.

В ряде случаев допускается определение расходов на содержание и эксплуатацию оборудования косвенным путем, а именно:

$$И_{с,об} = И^{осн}_{з,п} \eta_{с,об}/100,$$

где $\eta_{с,об}$ — процент расходов на содержание оборудования по отношению к основной зарплате производственных рабочих.

Цеховые расходы $И_ц$ включают затраты на содержание цехового персонала (ИТР, служащих, младшего обслуживающего персонала), амортизацию, текущий ремонт и содержание здания цеха, сооружений, инвентаря общецехового назначения и т. д.

$$И_ц = \left(И^{осн}_{з,п} + И_{с,об}\right) \eta_ц/100,$$

где $\eta_д$ — процент цеховых расходов по отношению к основной зарплате производственных рабочих и расходам на содержание и эксплуатацию оборудования.

Если в уровне механизации и автоматизации производства отдельных изделий нет больших различий, возможно распределение цеховых расходов пропорционально основной заработной плате производственных рабочих:

$$И_ц = И^{осн}_{з,п} \eta'_ц/100,$$

где $\eta'_ц$ — процент расходов по отношению к основной зарплате производственных рабочих.

В составе общезаводских расходов $И_{зав}$ учитываются затраты по общему управлению предприятием: заработная плата с начислениями персоналу заводоуправления, амортизация, содержание и текущий ремонт зданий, сооружений и инвентаря общезаводского назначения, конторские, типографские, почтово-телеграфные, телефонные и другие расходы.

При различном уровне механизации и автоматизации процессов изготовления отдельных изделий общезаводские расходы на единицу продукции $И_{зав}$:

$$И_{зав} = \left(И^{осн}_{з,п} + И_{с,об}\right) \eta_{зав}/100,$$

где $\eta_{зав}$ — процент общезаводских расходов по отношению к основной зарплате производственных рабочих и расходам на содержание и эксплуатацию оборудования.

При отсутствии существенных различий в уровне механизации и автоматизации производства различных изделий общезаводские расходы распределяются пропорционально основной зарплате производственных рабочих:

$$И_{зав} = И^{осн}_{з,п} \eta'_{зав}/100.$$

Внепроизводственные расходы $И_{вн}$ учитывают затраты, связанные в основном с реализацией изготовленной продукции (тара и упаковка продукции, доставка на станцию отправления), а также некоторые другие отчисления:

$$И_{вн} = С_{пр} \eta_{вн}/100,$$

где $С_{пр}$ — производственная себестоимость изделия, образуемая как сумма всех предыдущих статей затрат; $\eta_{вн}$ — процент внепроизводственных расходов по отношению к производственной себестоимости изделий.

Расчеты, выполненные по каждой статье, сводятся по форме табл. 11.7 (с примером).

Значения $\eta_{с,об}$, $\eta_ц$, $\eta_{зав}$, $\eta_{вн}$ принимаются по данным предприятия, где предполагается производство разрабатываемого изделия.

Далее производится сравнение и анализ себестоимости нового изделия с себестоимостью изделия-аналога, выявляются размеры и причины изменений отдельных составляющих себестоимости, отмечаются изменения в структуре себестоимости.

Указанный анализ целесообразно выполнять в табл. 11.8.

Изменение затрат по отдельным статьям в процентах определяется по формуле $(И''_i - И'_i)/И'_i$, где $И'_i$, $И''_i$ — затраты по i-й статье калькуляции соответственно по аналогу и новому изделию.

Таблица 11.7. Пример расчета себестоимости электроизделия

№ п/п.	Наименование статьи затрат	Сумма, руб.
1	Основные материалы	320,20
2	Покупные изделия, полуфабрикаты	45,30
3	Возвратные отходы (вычитаются)	6,40
4	Основная зарплата производственных рабочих	19,10
5	Дополнительная зарплата производственных рабочих (11,5 % к статье 4)	2,20
6	Отчисления на социальное страхование (14 % к сумме затрат по статьям 4 и 5)	3,00
7	Возмещение износа инструментов и приспособления целевого назначения	5,80
8	Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования (220 % к статье 4)	42,00
9	Цеховые расходы (115 % к статье 4)	22,00
10	Общезаводские расходы (120 % к статье 4)	22,90
	Итого производственная себестоимость	476,20
11	Внепроизводственные расходы (1,5 % производственной себестоимости)	7,10
	Итого полная себестоимость	483,30

Таблица 11.8. Анализ себестоимости изделий

№ п/п.	Наименование статьи	Новое изделие		Изделие-аналог		Изменение затрат	
		Сумма, руб.	Удельный вес, %	Сумма, руб.	Удельный вес, %	руб.	%
1	Основные материалы	2,6	8,4	2,1	9,5	+0,5	+23
2	Покупные изделия и т. д.	1,4	4,5	2,8	11,2	—1,4	—50

нятся от соответствующих затрат по сравниваемой конструкции.

В состав текущих (эксплуатационных) затрат $C_э$ входят:

амортизация электрооборудования на полное восстановление $И_а$;

затраты по межремонтному обслуживанию $И_{обс}$;

стоимость потерь электроэнергии $И_{эн}$;

стоимость ремонтов $И_р$.

Итак,

$$C_э = И_а + И_{обс} + И_р + И_{эн}.$$

В годовые эксплуатационные издержки по формуле на стр. 341 амортизация на полное восстановление рассматриваемых электроизделий не входит.

Таблица 11.9. Структура себестоимости электроизделий (% к производственной себестоимости)

Вид электроизделий	Производственная себестоимость	В том числе				
		основные материалы и покупные изделия	основная зарплата производственных рабочих	расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	цеховые расходы	общезаводские расходы
Электродвигатели малой мощности	100	45,0	22,5	17,5	4,5	10,5
Электродвигатели до 100 кВт	100	68,0	4,8	13,6	8,5	5,1
Электродвигатели свыше 100 кВт	100	75,0	4,4	9,1	5,9	5,6
Электродвигатели взрывозащищенные	100	60,5	8,4	15,5	7,3	8,3
Турбогенераторы	100	78,0	3,6	6,7	3,8	7,9
Гидрогенераторы	100	59,0	4,1	16,2	9,6	11,1
Трансформаторы силовые	100	77,0	6,0	9,0	3,0	5,0
Кабели силовые	100	83,6	2,1	8,5	3,2	2,6
Обмоточные провода	100	65,0	4,5	15,0	9,0	6,5
Гетинакс	100	76,9	3,0	7,4	4,6	8,1
Микалента	100	88,0	1,9	4,6	2,2	3,3
Стеклотекстолит	100	86,0	1,4	5,8	3,0	3,8
Низковольтная аппаратура	100	28,0	12,0	29,2	18,0	12,8

В табл. 11.9 приведена усредненная структура себестоимости различных видов изделий.

Определение затрат по эксплуатации электроизделий

При эксплуатации имеют место капитальные вложения и текущие (эксплуатационные) затраты.

К капитальным вложениям в области эксплуатации электроизделий относятся:

стоимость самого электроизделия;

расходы по его транспортировке к месту эксплуатации и монтажу;

стоимость производственных помещений, необходимых для его эксплуатации;

стоимость комплектующего оборудования;

изменение оборотных фондов (например, в части парка резервного оборудования, запасных частей вследствие изменения уровня надежности, унификации).

В сопутствующих капитальных вложениях стоимость самого электроизделия не учитывается.

Расчет капитальных вложений у потребителя может быть ограничен лишь теми составляющими их, которые изменяются в сравниваемых вариантах. Так, стоимость перевозки и монтажа спроектированного изделия, необходимой площади для его установки учитывается лишь тогда, когда они существенно различаются.

В каждом конкретном случае перечень подлежащих расчету и анализу составляющих эксплуатационных затрат можно ограничить лишь теми, которые претерпевают изменения в сравниваемых вариантах.

Расчету расходов по эксплуатации нового изделия должно предшествовать выявление среднего предполагаемого числа часов его работы в течение года, срока его службы, ресурса работы, периодичности проведения ремонтов и т. д.

Размер ежегодных амортизационных отчислений определяется исходя из первоначальной стоимости электрооборудования и соответствующих норм амортизации. Последние включают как отчисления, предназначенные на полное восстановление, так и отчисления на капитальный ремонт. Поскольку затраты на капитальный ремонт учитываются в общей сумме затрат на проведение всех видов ремонтов $И_р$, величина $И_а$ включает лишь отчисления на полное восстановление.

Амортизационные отчисления в этом случае будут составлять:

$$И_а = Ц_и H_а / 100,$$

где $Ц_и$ — стоимость единицы электрооборудования; $H_а$ — норма амортизационных отчислений в части, предназначенной на полное восстановление, в процентах. Нормы амортизационных отчислений приведены в табл. 11.10.

Таблица 11.10. **Нормы амортизационных отчислений по отдельным видам основных фондов (в процентах)** [11.8]

Вид основных фондов	Общая норма амортизации	В том числе	
		на капитальный ремонт	на полное восстановление
Здания	2,6	1,4	1,2
Универсальные и специализированные станки	14,1	7,4	6,7
Автоматические линии	10,3	3,2	7,1
Механизированный инструмент	20,0	—	20,0
Производственный и хозяйственный инвентарь	12,5	4,5	8,0
Транспортеры ленточные	24,9	5,7	19,2
Электрокары	22,7	6,7	16,0
Автопогрузчики	25,6	9,6	16,0
Электрические машины мощностью до 100 кВт	12,6	3,1	9,5
Электрические машины мощностью свыше 100 кВт	8,1	2,8	5,3
Электрические аппараты	6,4	2,9	3,5
Гидрогенераторы	2,9	0,9	2,0
Турбогенераторы	6,5	3,0	3,5
Трансформаторы силовые	6,4	2,9	3,5
Аккумуляторы: стационарные:			
кислотные	9,1	3,2	5,9
щелочные	12,5	—	12,5
переносные кислотные	33,3	—	33,3
Лабораторное оборудование и приборы	20,0	—	20,0
Счетно-вычислительные машины	12,0	2,0	10,0

Определение амортизационных отчислений исходя из нормы амортизации, допустимо лишь в случаях, когда сравниваемые варианты конструкций имеют одинаковый срок службы. В противном случае сумма ежегодных амортизационных отчислений по каждому из сравниваемых вариантов

$$И_а = Ц_и / T_{сл},$$

где $T_{сл}$ — срок службы электрооборудования в годах.

Стоимость потерь активной энергии

$$И^а_{эн} = \left(\frac{P_н}{\eta} - P_н\right) t k_з Ц_{эн},$$

где t — число часов работы электромашины в течение года, ч/год; $k_з$ — средний коэффициент ее загрузки; $P_н$ — номинальная мощность электромашины, кВт; η — КПД электромашины при коэффициенте загрузки $k_з$; $Ц_{эн}$ — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб/(кВт·ч), (применительно к тем энергетическим системам и видам потребителей электроэнергии, которые будут использовать данную машину).

Если сравниваемые конструкции отличаются также и уровнем потребления реактивной энергии, то определяется стоимость компенсирующих устройств, необходимых для поднятия коэффициента мощности до нормативного уровня $\cos \varphi_0$.

Стоимость самих компенсаторов должна быть включена в состав капитальных вложений заказчика. Амортизацию же их необходимо включить в эксплуатационные затраты:

$$К_к = \frac{P_н}{\eta} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_0) k_м Ц_к,$$

где $К_к$ — стоимость компенсирующих устройств, руб.; $\operatorname{tg} \varphi_1$, $\operatorname{tg} \varphi_0$ — тангенсы, соответствующие $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_0$, при этом $\cos \varphi_0 > \cos \varphi_1$; $k_м$ — коэффициент участия в максимуме нагрузке системы; $Ц_к$ — стоимость 1 квар реактивной мощности, руб/квар.

Амортизация компенсирующих устройств

$$И^к_а = К_к Н_а / 100,$$

где $Н_а$ — норма амортизационных отчислений по компенсирующим устройствам, %.

11.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕН НА НОВЫЕ ЭЛЕКТРОИЗДЕЛИЯ, НАДБАВОК И СКИДОК

Цены на новые изделия должны обеспечивать:

усиление экономической заинтересованности проектных, конструкторских, технологических организаций и предприятий-изготовителей, а также заказчиков в создании и быстрейшем внедрении в народное хозяйство высокоэффективной новой продукции, соответствующей по своим параметрам лучшим отечественным и зарубежным образцам;

относительное удешевление новой продукции для потребителя в расчете на единицу конечного полезного эффекта по сравнению с ранее освоенной;

снижение материалоемкости и трудоемкости и на этой основе себестоимости электроизделий при сохранении или улучшении их технико-экономических параметров.

Определение оптовых цен и экономического эффекта новых изделий осуществляется на всех стадиях ее проектирования — от разработки технико-экономического обоснования и технического задания на проектирование до начала серийного производства.

На стадиях разработки технико-экономического обоснования, технического задания, технического проекта производятся расчеты:

лимитной цены, обеспечивающей относительное удешевление новой продукции на единицу конечного полезного эффекта;

экономического эффекта от производства и использования нового изделия (рассчитывается с учетом лимитной цены).

На стадии разработки рабочей документации по результатам проведения приемочных испытаний и принятия опытного образца (партии) определяются:

проект оптовой цены;

экономический эффект от производства и использования новых изделий (рассчитывается с учетом проекта оптовой цены);

поощрительная надбавка к оптовой цене.

Определение лимитной цены на новое изделие

Лимитная цена электроизделия определяется по формуле

$$Ц_л = С + П_н,$$

где C — себстоимость по стадиям проектирования, руб.; $П_н$ — нормативная прибыль, руб.

Себестоимость электроизделия уточняется при переходе от начальных к последующим этапам разработки. С учетом увеличения объема и повышения достоверности исходной информации определяется:

предварительный уровень затрат на стадиях технического задания, технического предложения, эскизного проекта;

нормативная себестоимость на основе разрабатываемых технологических норм материальных и трудовых затрат на стадиях технического проекта и разработки рабочей документации.

Методика расчета себестоимости изделия приведена в § 11.2.

Нормативная прибыль определяется на основе утвержденных по соответствующим группам электроизделий нормативов рентабельности (в % к себестоимости) за вычетом материальных затрат: стоимости использованных материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий, топлива, энергии. Величина норматива рентабельности установлена по группам электроизделий в следующих размерах: электрические машины средней и малой мощности — 45; машины большой мощности, турбогенераторы и синхронные компенсаторы — 60; высоковольтные аппараты, трансформаторы, реакторы — 62; низковольтные аппараты — 30; оборудование электросварочное, промышленные печи и нагревательные установки — 54; кабельные изделия — 62; электроизоляционные изделия — 87; аккумуляторы и батареи аккумуляторные (свинцовые) — 76; источники света — 35; электростанции передвижные — 40 %.

В случаях, когда лимитная цена нового электроизделия выше оптовой цены базового изделия $Ц_б$, производится проверка обоснованности ее уровня по следующей формуле:

$$\frac{Ц_л}{Ц_б \dfrac{B_2}{B_1} \dfrac{1/T_1 + E_н}{1/T_2 + E_н} + \dfrac{И_1 - И_2}{\dfrac{1}{T_2} + E_н} \cdot 0{,}9} \leqslant 0{,}85,$$

где B_2/B_1 — коэффициент учета роста производительности единицы нового электроизделия по сравнению с базовым; $\dfrac{1/T_1 + E_н}{1/T_2 + E_н}$ — коэффициент учета изменения срока службы нового изделия по сравнению с базовым; $И_1$, $И_2$ — годовые эксплуатационные издержки при использовании базового и нового изделий в расчете на годовой объем продукции (работы), производимой с помощью нового изделия, руб.; 0,9 и 0,85 — коэффициенты относительного удешевления новой продукции, гарантирующие снижение лимитных цен на единицу конечного полезного эффекта.

В качестве базового изделия принимается прогрессивное, лучшее из освоенных отечественной промышленностью изделий.

При длительных сроках разработки нового электроизделия цена базового изделия должна соответствовать условиям расчетного года освоения выпуска новой продукции. Для этого себестоимость базового изделия корректируется по формуле

$$C'_б = C_б \frac{100}{100 + PT},$$

где $C_б$ — себестоимость базового изделия по плану года, в котором производится расчет лимитной цены, руб.; $C'_б$ — ожидаемая себестоимость базового изделия на первый год серийного производства нового изделия, руб.; P — среднегодовые темпы снижения себестоимости базового изделия, %; T — период времени (в годах) от начала проектирования нового электроизделия до первого года серийного выпуска.

Определение оптовой цены на новое изделие

Оптовые цены на новые изделия утверждаются на нормативный оптимальный срок обновления продукции, установленный Госпланом СССР и Государственным комитетом СССР по науке и технике. Оптовые цены вводятся в действие одновременно со стандартами и техническими условиями.

При утверждении оптовых цен на новую продукцию проверяются:

обоснованность уровня плановой себестоимости;

соответствие уровня оптовой цены лимитной;

экономическая эффективность новой продукции исходя из проекта оптовой цены;

соответствие уровня проектируемой цены на новую продукцию общей системе цен на группу аналогичных изделий. Производится расчет и дополнительное сопоставление удельных значений цен на единицу основных технико-экономических параметров новой и ранее освоенной продукции.

Оптовая цена на новую продукцию утверждается не выше уровня лимитной цены.

Исходной базой оптовой цены $Ц_н$ является отраслевая себестоимость, отражающая общественно необходимые условия производства новой продукции и их нормативную прибыль:

$$Ц_н = C + П_н,$$

где C — себестоимость нового изделия, руб.; $П_н$ — нормативная прибыль, руб.

При установлении оптовой цены плановая себестоимость определяется для условий первого года серийного выпуска нового изделия. При этом расходы по подготовке и освоению производства новой продукции подлежат возмещению за счет средств Единого фонда развития науки и техники (см. § 11.6).

Материальные и трудовые затраты по новому изделию рассчитываются исходя из технически обоснованных норм.

Порядок расчета себестоимости изложен в § 11.2.

Расчет надбавки к цене на новое изделие

Надбавки к оптовым ценам устанавливаются на новые высокоэффективные изделия, соответствующие по своим параметрам лучшим отечественным и зарубежным образцам.

Таблица 11.11. **Типовая шкала размеров поощрительной надбавки к оптовой цене нового электроизделия [11.3]**

$\frac{Э}{Ц_н}$ 100	Размер поощрительной надбавки % к нормативной прибыли	
	за достижение минимальной границы интервала	за каждую единицу внутри интервала
15—35	50	0,20
35—55	54	0,25
55—75	59	0,30
75—95	65	0,35
95—115	72	0,45
115—135	81	0,60
135—155	93	0,75
155—175	108	0,85
175 и выше	125	—

Надбавка устанавливается на срок до одного года, а на продукцию особой сложности — до двух лет. При присвоении изделию в течение этого года государственного Знака качества действие надбавки продлевается без изменения ее размера. Общий срок действия надбавки устанавливается до 4 лет, а по продукции особой сложности — до 5 лет.

Поощрительные надбавки к оптовым ценам определяются в зависимости от годового экономического эффекта (см. § 11.1) в размере от 0,5 до 1,25 норматива рентабельности, принятого при определении цен для данной группы изделий, но не свыше 70 % размера указанного эффекта.

Поощрительные надбавки дифференцируются в зависимости от соотношения экономического эффекта $Э$ и оптовой цены нового изделия $Ц_н$ по типовой шкале, приведенной в табл. 11.11.

Применительно к отдельным видам электроизделий (трансформаторы, кабельные изделия) в типовую шкалу внесены изменения (табл. 11.12, 11.13).

В соответствии с [11.3] при определении экономического эффекта на стадии разработки нового изделия вместо приведенных затрат по базовому изделию $З_1$ принимается действующая оптовая цена $Ц_б$, а по новому изделию $З_2$ — лимитная цена $Ц_л$. На стадии утверждения оптовой цены вместо $З_2$ принимается проект оптовой цены $Ц_н$.

Если преимущества новой продукции не могут быть выражены в виде экономического эффекта (воздействие на окружающую среду, техника безопасности, облегчение условий труда и т. д.), а также в других обоснованных случаях, поощрительная надбавка устанавливается в размере до 30 % нормативной прибыли.

Размер надбавки к оптовой цене увеличивается в 1,5 раза, если производство нового изделия основано на разработках, признанных в установленном порядке открытиями или изобретениями.

Размер поощрительной надбавки увеличивается также при снижении материалоемкости и трудоемкости нового изделия по сравнению с базовым.

На новые электроизделия со сниженной материалоемкостью и трудоемкостью, которые по своим технико-экономическим параметрам соответствуют высшей категории качества, поощрительная надбавка предусматривается в

Таблица 11.12. **Шкала для расчета поощрительных надбавок на новые трансформаторы**

$\frac{Э}{Ц_н}$ 100	Размер поощрительной надбавки, % к нормативной прибыли	
	за достижение минимальной границы интервала	за каждую единицу внутри интервала
12—32	50	0,2
32—52	54	0,25
52—72	59	0,3
72—92	65	0,35
92—112	72	0,45
112—132	81	0,6
132—152	93	0,75
152—172	108	0,85
172 и выше	125	—

Таблица 11.13. **Шкала для расчета поощрительных надбавок на новые кабельные изделия**

$\frac{Э}{Ц_н}$ 100	Размер поощрительной надбавки, % к нормативной прибыли	
	за достижение минимальной границы интервала	за каждую единицу внутри интервала
10—30	50	0,2
30—50	54	0,25
50—70	59	0,3
70—90	65	0,35
90—110	72	0,45
110—130	81	0,6
130—150	93	0,75
150—170	108	0,85
170 и выше	125	—

размере до 50 % экономии затрат, но не выше двух нормативов рентабельности (см. также § 11.5).

При лишении объединений или предприятий права применять государственный Знак качества автоматически прекращается действие поощрительных надбавок к оптовым ценам. При повторной аттестации продукции и присвоении ей второй раз государственного Знака качества поощрительные надбавки к оптовым ценам переутверждаются в том же размере при условии улучшения технико-экономических параметров данной продукции. Если же технико-экономические параметры не улучшаются, размер надбавок и срок их действия сокращаются вдвое.

Дополнительная прибыль (сумма надбавок к оптовым ценам), полученная производственным объединением (предприятием) от реализации новой высокоэффективной продукции и продукции с государственным Знаком качества, распределяется в следующем порядке: до 70 % ее направляется в фонды экономического стимулирования производственных объединений (предприятия), научно-исследовательских, проектно-конструкторских и технологических организаций, а остальная часть распределяется поровну между единым фондом развития науки и техники и государственным бюджетом.

По продукции, подлежащей снятию с производства, а также по продукции, которая в установленный срок не аттестована, применяются скидки с оптовых цен в размере 50 % суммы прибыли, получаемой от реализации этой продукции. По истечении срока снятия с производства продукции скидки с оптовых цен

Таблица 11.14. **Технико-экономические показатели и расчет оптовой цены с надбавкой на двигатель синхронный (цифры условные)**

№ п/п.	Показатель	Единица	Базисное изделие	Новое изделие
1	Мощность	кВт	500	500
2	КПД	%	91,6	94,4
3	Масса	кг	8200	5600
4	Себестоимость	руб.	11 000	9000
5	Прибыль:			
	фактическая	»	1600	
	нормативная			
6	Оптовая цена базисного изделия	»	12 600	1350
7	Годовой экономический эффект	»		6000
	В том числе:			
	в производстве	«		2000
	в эксплуатации (за счет повышения КПД)	»		4000
8	Оптовая цена нового изделия*	»		10 600 (9000+ +1600)
9	Расчет поощрительных надбавок:	»		
	а) за счет экономического эффекта в эксплуатации**	»		740
	б) 50 % экономии в производстве	»		1000
	в) итого возможная поощрительная надбавка	»		1740
	г) предельно допустимая надбавка в размере двух нормативов рентабельности	»		2700 (1350× ×2)
	д) устанавливаемый размер поощрительной надбавки	»		1740
10	Оптовая цена нового изделия с поощрительной надбавкой	»		12 340 (10600+ +1740)

* Прибыль, включаемая в оптовую цену, принята в размере достигнутой при производстве заменяемой продукции.

** Расчет поощрительной надбавки за счет экономического эффекта в эксплуатации определяется в соответствии со шкалой, приведенной в табл. 11.11, а именно (4000 : 10 600)·100=37,7 %, что соответствует размеру надбавки 54,75 % нормативной прибыли. Размер надбавки (1350·54,75) : 100=740 руб.

устанавливаются в размере полной суммы прибыли. При этом продукция реализуется по ценам без скидок, а сумма этих скидок вносится в государственный бюджет.

В табл. 11.14 дается пример расчета оптовой цены и поощрительной надбавки на двигатель синхронный, аттестованный по высшей категории качества и имеющий экономию материальных и трудовых затрат в производстве.

11.4. КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВЫХ ЭЛЕКТРОИЗДЕЛИЙ

Технико-экономические показатели сравниваемых вариантов электроизделий

Для анализа и оценки эффективности сравниваемых конструкций электроизделий составляется сравнительная таблица технико-экономических показателей (табл. 11.15).

Таблица 11.15. **Технико-экономические показатели**

Показатель	Единица	Варианты конструкций	
		проектируемые	существующие

В данной таблице группы показателей приводятся в следующей последовательности:

технико-эксплуатационные — мощность, напряжение, частота вращения, кратность пускового момента, быстродействие, уровень шума, КПД, коэффициент мощности, масса, габаритные размеры, точность, пределы регулирования и т. д.;

надежности и долговечности — безотказность (интенсивность отказов, наработка на отказ), ремонтопригодность (приспособленность изделия к быстрому обнаружению и устранению неисправностей), срок службы в годах, ресурс работы в часах, допустимое число включений и отключений, гарантийный ресурс, длительность ремонтного цикла, межремонтного периода и пр.;

технологичность — материалоемкость, трудоемкость, уровень механизации и автоматизации, удельный вес ручных работ, коэффициент оснащенности, длительность производственного цикла и др.;

эстетические, эргономические — внешний вид изделия, его соответствие современному стилю, удобство обслуживания и т. д.;

стандартизации и унификации — коэффициенты стандартизации, унификации, конструктивной преемственности, повторяемости и т. д.;

патентно-правовые — показатель патентной чистоты, возможность продажи лицензии, сбыта за рубежом;

экономические: а) в производстве — затраты на освоение, длительность цикла освоения, затраты на специальное оборудование и специальное оснащение, стоимость материалов, производственная зарплата, себестоимость, оптовая цена; б) в эксплуатации — стоимость активной и реактивной энергии, обслуживания, текущих и капитальных ремонтов, амортизация, возможный ущерб от ненадежной работы, размер сопутствующих капитальных вложений; в) в народном хозяйстве — годовой экономический эффект, размер надбавки к цене.

Пример определения годового экономического эффекта от внедрения в народное хозяйство нового электродвигателя (цифры условные)

Исходные данные для расчета приведены в табл. 11.16.

Текущие издержки рассчитаны в табл. 11.17.

Сопутствующие капитальные вложения в нашем примере имеют место в компенсирующие устройства ввиду изменения коэффициента мощности. Стоимость компенсирующих устройств составит:

Таблица 11.16. Технико-экономические показатели сравниваемых электродвигателей

№ п/п.	Показатель	Единица	Базовое изделие	Новое изделие
1	Мощность	кВт	35	40
2	КПД	%	90,5	92,5
3	Коэффициент мощности	—	0,88	0,89
4	Масса	кг	320	400
5	Срок службы с учетом морального износа	лет	4	6
6	Себестоимость изготовления	руб.	360	400
7	Нормативная прибыль	руб.	50	50
8	Оптовая цена	руб.	410	450

Таблица 11.17. Расчет текущих издержек в эксплуатации

№ п/п.	Статья затрат	Базовое изделие. руб/год	Новое изделие, руб/год
1	Стоимость потерь активной электроэнергии	168	187
2	Амортизация компенсирующих устройств	2,37	2,14
3	Стоимость ремонтов	36	24
	Итого	206,37	213,14

для базового двигателя

$$\frac{35}{0{,}905}(0{,}533-0{,}353)\,0{,}25\cdot 13{,}5=23{,}7 \text{ руб.};$$

для нового двигателя

$$\frac{40}{0{,}925}(0{,}5-0{,}353)\,0{,}25\cdot 13{,}5=21{,}4 \text{ руб.}$$

При этом 0,353 соответствует $\cos\varphi_0=0{,}94$, при котором предприятие не платит штрафов и не получает льгот за коэффициент мощности.

Годовой экономический эффект от внедрения в народное хозяйство нового электродвигателя составит

$$\Theta = 410\,\frac{40}{35}\,\frac{0{,}25+0{,}15}{0{,}166+0{,}15}+$$

$$+\frac{\left(206\,\frac{40}{35}-213\right)-0{,}15\left(21{,}4-23{,}7\,\frac{40}{35}\right)}{0{,}166+0{,}15}-$$

$$-450=160 \text{ руб.}$$

Надбавка к цене на новое изделие в соответствии с табл. 11.11 составит 27 руб.

Определение эффективности новых электроизделий на основе метода балльно-индексной оценки

Преимущество метода балльно-индексной оценки состоит в том, что он дает возможность соизмерить в сравниваемых вариантах большое число показателей, в том числе и те, которые трудно поддаются денежной оценке, например чувствительность, точность, диапазон регулирования, кратность пусковых моментов и т. д. Таким образом, балльно-индексный метод позволяет дать более широкую, а отчасти и более глубокую оценку эффективности проектируемой конструкции, чем метод приведенных затрат, используемый при расчете годового экономического эффекта.

Таблица 11.18. Балльно-индексный анализ эффективности

Показатель	Индекс баллозначимости, %	Варианты конструкций			
		Балл	Взвешенный балл	Балл	Взвешенный балл

При использовании метода балльно-индексной оценки прежде всего необходимо экспертным путем установить необходимый для анализа перечень показателей и оценку в баллах. Суммарная значимость всех показателей равна 100 %.

При установлении перечня анализируемых показателей для оценки их в баллах используются данные, приведенные в сравнительной

Таблица 11.19. Балльно-индексный анализ экономической эффективности силовых трансформаторов

Показатель	Индекс баллозначимости, %	Вариант 1		Вариант 2	
		Балл	Взвешенный балл	Балл	Взвешенный балл
Удельный показатель расхода металла (на 1 кВ·А)	3	9	27	6	18
Удельный расход трансформаторной стали (на 1 кВ·А)	6	10	60	6	36
Удельная трудоемкость изготовления (на 1 кВ·А)	4	8	32	5	20
Удельный вес механизированных работ	3	6	18	5	15
Длительность технологического цикла	4	7	28	4	16
Повторяемость, унифицированность	3	3	9	6	18
Долговечность	12	6	72	5	60
Срок пуска	4	5	20	4	16
Ремонтопригодность	8	3	24	4	32
Безопасность и гигиеничность в эксплуатации	9	5	45	6	54
Технический ресурс	5	7	35	6	30
Суммарные потери	9	9	81	6	54
Возможность патентования и сбыта за рубежом	2	3	6	4	8
Удельная себестоимость	5	5	25	3	15
Прибыльность	4	6	24	8	32
Рентабельность	6	4	24	6	36
Приведенные затраты	10	5	50	4	40
Срок внедрения конструкции	3	4	12	3	9
Итого	100		592		509

таблице технико-экономических показателей (табл. 11.15).

Максимальная оценка принимается равной 10 баллам. Анализ сравниваемых конструкций электроизделий выполняется в табл. 11.18.

Эффективным является вариант, набравший большую сумму взвешенных баллов.

Пример анализа эффективности новых конструкций на основе метода балльно-индексной оценки приведен в табл. 11.19.

Экономически эффективным является первый вариант, как набравший большую сумму взвешенных баллов.

Однако к суммированию баллов по различным показателям следует подходить весьма осторожно, ибо ухудшение важнейших для потребителя показателей не может быть компенсировано даже значительным улучшением второстепенных показателей.

11.5. АТТЕСТАЦИЯ ПРОДУКЦИИ

Аттестация электроизделий проводится с 1966 г. За этот период аттестация стала общепризнанным средством повышения технического уровня и качества изделий, всесторонней оценки их технического уровня, дальнейшего расширения производства изделий высокого качества, систематического обновления продукции электротехнической промышленности.

В соответствии с постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О мерах по ускорению научно-технического прогресса в народном хозяйстве» («Правда» 28 августа 1983 г.) с 1984 г. вводится новый порядок аттестации продукции, призванный повысить объективность аттестации, ужесточить требования к аттестуемой продукции, прежде всего высшей категории качества.

Признано целесообразным вместо трех категорий качества (высшей, первой и второй) ввести только две — высшую и первую. Изделия, не аттестованные по этим категориям, подлежат снятию с производства. Госплану СССР предоставлено право разрешать в виде исключения, производство указанной продукции в течение не более двух лет.

Постановлением дается право устанавливать поощрительные надбавки в размере до 30 % к оптовым ценам на новую высокоэффективную продукцию и скидки в размере до 30 % с оптовых цен на промышленную продукцию, подлежащую снятию с производства.

Аттестацию будут проводить только государственные комиссии: только они будут присуждать Знак качества или относить продукцию к первой категории.

В своей работе они будут ориентироваться на стандарты, устанавливающие требования к технико-экономическим показателям машин, оборудования, приборов, сырья, материалов, комплектующих изделий, которые соответствуют перспективному мировому уровню техники и технологии.

Роль и ответственность государственных аттестационных комиссий существенно возрастают. В их состав войдут наиболее квалифицированные и компетентные специалисты. При аттестации важнейших видов продукции комиссии будут возглавлять представители ГКНТ. Ставится задача, чтобы продукция со Знаком качества была конкурентоспособной. Поэтому в необходимых случаях в состав комиссий будут включены и представители Министерства внешней торговли.

11.6. СТИМУЛИРОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Стимулирование экономии материальных, трудовых и энергетических ресурсов при производстве и эксплуатации электроизделий

Экономное и рациональное использование материальных, топливно-энергетических и трудовых ресурсов, повышение качества является важнейшей задачей при разработке, изготовлении и эксплуатации электроизделий.

В электротехнической промышленности действует система экономии материальных и трудовых ресурсов, в состав которой входят следующие основные элементы:

разработка и освоение в производстве новых видов электротехнического оборудования и изделий со сниженной материалоемкостью и трудоемкостью. Так, расход материалов на 1 кВт в турбогенераторе мощностью 300 тыс. кВт составляет 1,2 кг, а в турбогенераторе мощностью 800 тыс. кВт — около 0,7 кг;

внедрение прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих экономию материалов и рост производительности труда;

применение новых прогрессивных материалов, обеспечивающих повышение качества, надежности, долговечности;

внедрение метода функционально-стоимостного анализа, позволяющего выявлять наиболее экономичные конструктивные и технологические решения;

совершенствование нормирования, хранения и учета материальных ресурсов;

экономическое стимулирование предприятий и материальное поощрение их работников за реальную экономию материалов.

Повышению эффективности электроизделий способствует систематическое проведение аттестации (см. § 11.5); система установления оптовых цен; надбавок к ценам и скидок (см. § 11.3); формирование фондов экономического стимулирования; система премирования работников объединений, предприятий; проведение функционально-стоимостного анализа (см. § 11.7).

В соответствии с постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 30 июня 1981 г. «Об усилении работы по экономии и рациональному использованию сырьевых, топливно-энергетических и других материальных ресурсов» министерствам, объединениям, предприятиям утверждаются в пятилетних и годовых планах задания по себестоимости продукции и лимиты материальных затрат на рубль продукции. При снижении материальных затрат по сравнению с утвержденным лимитом производятся за счет полученной экономии прямые отчисления в фонды поощрения (фонд материального поощрения и фонд социально-культурных мероприятий и жилищного строительства).

При превышении лимита материальных затрат отчисления в фонды поощрения уменьшаются, но не более чем на 25 % их плановой

величины по пятилетнему плану на соответствующий год.

Сумма экономии (перерасхода) материальных затрат, на величину которой увеличиваются (уменьшаются) фонды поощрения, распределяется между фондом материального поощрения и фондом социально-культурных мероприятий и жилищного строительства пропорционально их размерам, утвержденным в пятилетнем плане на соответствующий год.

Нормативы образования фондов поощрения устанавливаются с учетом выполнения планов по росту производительности труда; снижению затрат на рубль товарной продукции; росту выпуска продукции высшей категории качества.

Оплата материалов, топлива и энергии, расходуемых сверх норм (лимитов) производится по повышенным ценам и тарифам.

В стандарты и технические условия стали включаться в числе основных характеристик продукции показатели ее материалоемкости и энергоемкости, отвечающие лучшим достижениям отечественной и зарубежной науки и техники. Высшая категория качества присваивается изделиям только при выполнении указанных требований.

Существенно повышена заинтересованность рабочих, руководящих, инженерно-технических работников и служащих объединений, предприятий и организаций в эффективном использовании материальных ресурсов.

Расширено, начиная с 1982 г., премирование рабочих, мастеров, технологов, конструкторов и других инженерно-технических работников за экономию конкретных видов материальных ресурсов против установленных технически обоснованных норм расхода. Выплата премий при этом может достигать 75 % суммы экономии материальных ресурсов в зависимости от их вида, стоимости и дефицитности.

С 1983 г. введено премирование руководящих работников и служащих объединений, предприятий в зависимости от уровня материальных затрат на рубль продукции по сравнению с утвержденным лимитом, с учетом выполнения заданий по себестоимости продукции, Премирование руководителей подразделений объединений, предприятий стало также осуществляться в зависимости от экономии материальных затрат, с учетом выполнения плановых заданий по себестоимости.

С целью усиления заинтересованности коллективов в более полном использовании промышленных отходов, вторичных ресурсов и местного сырья с 1982 г. прибыль от реализации товаров народного потребления и изделий производственно-технического назначения, изготовленных из отходов производства, остается в распоряжении объединений, предприятий и зачисляется в фонд ширпотреба: при рентабельности (к себестоимости) до 25 % полностью, свыше 25 % в половинном размере при условии, если стоимость отходов, израсходованных на производство указанных товаров и изделий, составляет 50 и более процентов стоимости всего сырья и материалов.

Широкая система мер по стимулированию создания высокоэффективной продукции, экономии материальных и трудовых ресурсов используется в соответствии с [11.3] при установлении оптовых цен на новые изделия, надбавок и скидок (см. § 11.3).

При сохранении качества и неизменности технико-экономических параметров продукции (по сравнению с ранее выпускаемой) и снижении ее трудоемкости, материалоемкости, замене полноценного сырья и материалов на вторичное сырье и отходы производства, использовании дешевых видов материалов оптовые цены на новую продукцию определяются на уровне действующих цен заменяемых изделий.

По изделиям высшей категории качества со сниженными материальными и трудовыми затратами поощрительная надбавка определяется как сумма надбавок за эффективность и экономию от сокращения материальных и трудовых затрат. Однако общий (суммарный) размер надбавки не может превышать двух нормативов рентабельности. При этом размер надбавки за эффективность (государственный Знак качества) устанавливается без учета указаний экономии. Пример расчета суммарной надбавки приведен в § 11.3.

Повышение производительности труда в результате использования новой техники, позволяющее высвободить рабочих, стимулируется учетом кроме экономии по заработной плате также выплат из фондов общественного потребления в размере 40 % фонда заработной платы.

Порядок образования и использования фондов экономического стимулирования научных и проектных организаций

Научные и проектные организации электротехнической промышленности находятся на хозрасчете. Для стимулирования работ по созданию и внедрению новой высокоэффективной продукции в них создаются фонды экономического стимулирования: фонд материального поощрения, фонд социально-культурных мероприятий и жилищного строительства, фонд развития организации.

Основой образования поощрительных фондов является экономическая эффективность от использования новой техники. Основными источниками формирования фонда материального поощрения и фонда социально-культурных мероприятий и жилищного строительства научных и проектных организаций являются:

а) отчисления от прибыли, образующейся на предприятиях за счет снижения себестоимости продукции в результате внедрения разработок научных и проектных организаций;

б) отчисления от дополнительной прибыли, полученной предприятием за счет поощрительных надбавок к оптовым ценам на новую высокоэффективную продукцию;

в) средства, включаемые в сметную стоимость научно-исследовательских, конструкторских и технологических работ;

г) средства, полученные в виде премий по конкурсным проектам;

д) средства, выделяемые министерством из централизованного премиального фонда за создание, освоение и внедрение новой техники.

Размеры отчислений в фонды поощрения организации определяются по источнику, указанному в п. «а» — по нормативу в процентах экономического эффекта, получаемого от внедрения результатов новых разработок.

В случаях, когда работа по созданию, освоению и внедрению новой техники выполняется несколькими организациями и предприятиями, распределение общей суммы средств, отчисляемых в фонды поощрения, производится в следующих размерах (в процентах общей суммы отчислений за работу):

Виды работ			Всего
Исследовательские и проектно-конструкторские работы	Технологические работы и работы по подготовке производства	Работы по освоению и организации производства новой техники	
20—40	20—40	30—50	100

В министерствах образуется централизованный премиальный фонд за создание, освоение и внедрение новой техники. В этот фонд научные и проектные организации, предприятия отчисляют до 20 % средств, предназначенных для образования фондов поощрения за создание, освоение и внедрение новой техники.

Централизованный премиальный фонд используется:

на поощрение работников организаций и предприятий за выполнение фундаментальных, теоретических и поисковых научных работ;

на увеличение до 25 % размеров поощрения за создание, освоение и внедрение новой техники, использование которой значительно снижает трудоемкость производства и в первую очередь на работах с тяжелыми и вредными условиями труда:

на увеличение до 25 % размеров поощрения за создание, освоение и внедрение новой техники, предназначенной для поставки на экспорт или замены импортируемой продукции.

Сумма премий из фонда материального поощрения в научных и проектных организациях электротехнической промышленности за последние годы возросла до 15—30 % к их годовым фондам зарплаты.

Единый фонд развития науки и техники (ЕФРНТ)

Фонд ЕФРНТ создается в министерстве для финансирования научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ и возмещения затрат, связанных с разработкой и освоением новых видов продукции и технологических процессов, с внедрением научной организации труда, а также финансирования дополнительных затрат по улучшению качества продукции и повышенных затрат в первые годы производства новой продукции.

ЕФРНТ образуется за счет отчислений от плановой прибыли объединений, предприятий по определенному нормативу (в процентах к товарной продукции), устанавливаемому по годам пятилетки. При невыполнении объединением, предприятием плана по прибыли отчисления в ЕФРНТ соответственно уменьшаются. Таким образом, образование ЕФРНТ полностью зависит от роста эффективности производства и выполнения плана по прибыли всех предприятий министерства.

Кроме того, в ЕФРНТ направляется часть дополнительной прибыли, образуемой в результате надбавок к оптовой цене новой высокоэффективной продукции и продукции с государственным Знаком качества.

Неиспользованная часть ЕФРНТ в текущем году не подлежит изъятию в государственный бюджет и может быть использована в следующем.

Возмещение затрат из ЕФРНТ объединениям (предприятиям) осуществляется министерством или всесоюзными промышленными объединениями ежемесячно на основе утвержденных смет расходов.

Стоимость работ промышленного характера, связанных с освоением и внедрением новой техники и осуществляемых за счет средств единого фонда, учитывается в общем объеме продукции объединения, предприятия с начислением нормативной прибыли по соответствующим группам изделий.

К указанным работам относятся:

производственные испытания материалов, полуфабрикатов, инструмента, приспособлений для новой техники;

изготовление и испытания опытных образцов, узлов и макетов;

изготовление и производственные испытания первого промышленного образца (серии);

перестановка и переналадка оборудования, произведенные силами промышленно-производственного персонала;

изготовление первоначального комплекта оснастки, специнструмента и приспособлений.

В объемы продукции включаются также повышенные затраты первого года выпуска новых изделий, финансируемые за счет средств единого фонда.

11.7. ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНЫЙ АНАЛИЗ (ФСА)

Общие положения по проведению функционально-стоимостного анализа

ФСА — это технико-экономический метод нахождения по специальной программе резервов уменьшения затрат на производство и эксплуатацию изделий путем исследования основных и вспомогательных функций объекта анализа и инженерного поиска наиболее экономичных технических решений их осуществления.

Объект анализа — изделие, элементы его конструкции, технология изготовления, организация производства.

При ФСА предусматривается проведение следующих работ: выбор объекта анализа; определение функций, выполняемых объектом анализа и его составляющими: выявление функциональных зон с наибольшим сосредоточением затрат; выделение основных, вспомогательных и ненужных функций в объекте анализа; разработка новых, наиболее экономичных технических решений выполнения объектом анализа его функций.

Метод ФСА характеризует коллективное (группой специалистов) изучение материалов, связанных с конструкцией, технологией, организацией производства, эксплуатацией объекта анализа. Сопоставление важности и необходи-

мости какой-либо функции, выполняемой объектом анализа, с затратами на ее выполнение позволяет выделить ненужные и дорогостоящие функции изделия. В процессе ФСА формируются предложения по техническим решениям наиболее рационального выполнения объектом его функций.

Эффективность функционально-стоимостного анализа

Метод ФСА в полной мере отвечает сегодняшним требованиям по повышению эффективности производства, интенсификации экономики. Он позволяет добиться минимизации затрат на создание и функционирование анализируемого объекта на протяжении его полного жизненного цикла. В расчет при этом берутся совокупные затраты, связанные с исследованием, проектированием, опытно-конструкторскими разработками, подготовкой производства, изготовлением, распределением и доставкой потребителю, эксплуатацией, обслуживанием и ремонтом и, наконец, ликвидацией, включая утилизацию отходов.

Уровень затрат при ФСА определяется конечным назначением, основными функциями объекта анализа.

В Министерстве электротехнической промышленности ФСА используется с 1974 г. и приносит значительный эффект. Так, шахтные кабели по давней традиции изготовляли с расцветкой основных жил. Горнякам же она совсем не обязательна, тем более что скрыта черным экраном изоляции. Отказ от цветных жил сберегает производству около 950 тыс. руб.

Использование ФСА при модернизации выключателя АП50 позволило снизить производственные затраты на 870 тыс. руб., существенно уменьшить расход серебра и проката черных металлов, снизить трудоемкость изготовления выключателей.

После внедрения в производство предложений службы ФСА по изготовлению светильников СЖ-6 был получен следующий эффект, представленный в таблице.

Фукциональные зоны	Количество наименований деталей		Трудоемкость изготовления на 100 штук изделий (нормо-часы)	
	до ФСА	после ФСА	до ФСА	после ФСА
Замок	7	5	83,2	23,9
Шарнир	6	6	19,9	19,9
Корпус	3	1	127,2	65,0
Кольцо	4	3	72,0	53,0
Изделие в целом	20	15	372,06 (вместе с затратами по сборке, окраске и т. д.)	171,7

ФСА должен в первую очередь применяться для изделий, выпускаемых крупными партиями или в массовом порядке.

Функциональный подход диктует необходимость анализа запросов заказчиков с позиции их технико-экономической обоснованности.

Введение в ряд трансформаторов новой серии устройств на номинальный ток 400 А (ранее выпускались трансформаторы только на токи 300 и 500 А) позволило сократить на каждой машине материальные и трудовые затраты более чем на 100 руб., а в расчете на весь выпуск трансформаторов сэкономить ресурсы на несколько миллионов рублей.

Наиболее значительный эффект применение ФСА дает на стадии создания новых изделий, предупреждая ненужные затраты в производстве и эксплуатации электроизделий.

По имеющимся данным эффективность применения ФСА на этой стадии почти в 1,5 раза превышает эффект от проведения мероприятий, рекомендованных ФСА на стадии промышленного производства изделий.

Проведение ФСА одного из трансформаторов на стадии эскизной проработки позволило найти ряд решений по уменьшению геометрических размеров изделия, изменению конструкции и технологии изготовления обмоток, замене остродефицитных буковых планок, используемых для крепления отводов, на бакелитовые трубки и т. д.

Опыт использования ФСА на стадиях НИР и ОКР показал целесообразность его применения не с момента разработки технического задания, а с анализа задаваемых потребителем комплекса технико-экономических требований. Только на этой основе можно впоследствии организовать работу по минимизации затрат на создание, изготовление и эксплуатацию электроизделий.

Существенным результатом ФСА является воспитание в людях умения считать и экономно использовать ресурсы.

Инженерное и экономическое направления мышления объединяются здесь для решения двуединой задачи — сокращения совокупности затрат при одновременном увеличении потребительной стоимости изделия.

Головным институтом по ФСА в электротехнической промышленности является ВНИИстандартэлектро, а общее руководство по использованию ФСА в отрасли осуществляет координационный Совет во главе с заместителем министра.

11.8. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА

Если изменение технологии не оказывает влияния на эксплуатационные показатели изготавливаемых изделий, то экономический эффект может быть найден по упрощенной формуле

$$Э = (З' - З'') A_2,$$

где $З'$, $З''$ — приведенные затраты завода-изготовителя в сравниваемых вариантах технологических процессов, руб.; A_2 — годовой выпуск изделий на основе нового процесса в рас-

четном году в натуральных единицах; $З = E_н K_и^{уд} + C_т$; $E_н$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (0,15); $K_и^{уд}$ — удельные капитальные вложения завода-изготовителя, руб.; $C_т$ — технологическая себестоимость изготовления электроизделия, руб.

Целесообразно определить также срок окупаемости $T_{ок}$ дополнительных капитальных затрат, необходимых для внедрения нового техпроцесса:

$$T_{ок} = \frac{K_и'' - K_и'}{(C_т' - C_т'')\, A_2}.$$

Мероприятие эффективно, если $T_{ок} \leqslant T_н$. Нормативный срок окупаемости $T_н = 1/E_н = 6{,}7$ года.

Размер выпуска, начиная с которого применение нового техпроцесса является экономически эффективным,

$$n_{кр} = \frac{E_н (K_и'' - K_и')}{C_т' - C_т''}.$$

В составе капитальных вложений завода-изготовителя учитываются изменяющиеся при совершенствовании технологии затраты на необходимые научно-исследовательские и проектные работы, на технологическое оборудование, специальное оснащение, производственную площадь, незавершенное производство.

Если совершенствование технологии вызывает досрочный демонтаж действующего производственного оборудования, то в составе капитальных вложений учитываются соответствующие затраты:

$$K = K_{на} - K_в,$$

где $K_{на}$ — неамортизированная часть стоимости демонтируемого оборудования, руб.; $K_в$ — выручка от реализации этого оборудования, руб.

В составе технологической себестоимости учитываются лишь те затраты, на которые внедрение нового техпроцесса оказывает непосредственное влияние. При этом обычно определяется изменение затрат на основные материалы, зарплату производственным рабочим, амортизацию и текущий ремонт оборудования и производственной площади, технологическую энергию, а также стоимость износа малоценных (до 50 руб.) и быстроизнашивающихся (сроком службы до 1 года) инструментов и приспособлений.

В соответствии с [11.3] при определении экономии по заработной плате в связи с применением автоматических манипуляторов с программным управлением (промышленных роботов), использованием техники для районов Крайнего Севера, а также во всех случаях обеспечения реальной экономии при абсолютном высвобождении рабочих дополнительно учитываются выплаты из фондов общественного потребления в размере 40 % фонда заработной платы.

Список литературы

11.1. **Методика** (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. Утв. ГКНТ, Госпланом СССР, Академией наук СССР и Госкомизобретений 14 февраля 1977 г. № 48/16/13/3. М., 1977. 53 с.

11.2. **Инструкция** по определению экономической эффективности новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в электротехнической промышленности. М., 1979. 71 с.

11.3. **Цены** на новую продукцию. Методика определения оптовых цен и нормативов чистой продукции на новые машины, оборудование и приборы производственно-технического назначения. Утверждена постановлением Государственного комитета СССР по ценам от 7 декабря 1982 г. № 920. М.: Прейскурантиздат, 1982. 37 с.

11.4. **Совершенствование** хозяйственного механизма. Сб. документов. Изд. 2-е, доп. М.: Правда, 1982. 351 с.

11.5. **Основы** функционально-стоимостного анализа/Под ред. М. Г. Карпунина и Б. И. Майданчика. — М.: Энергия, 1980. 175 с.

11.6. **Состояние** и перспективы развития функционально-стоимостного анализа в электротехнической промышленности. — М.: Информэлектро, 1982. 81 с.

11.7. **Астафьев В. Е.** Совершенствование хозяйственного механизма в электротехнической промышленности. М.: Энергоиздат, 1981. 127 с.

11.8. **Нормы** амортизационных отчислений по основным фондам народного хозяйства и положение о порядке планирования, начисления и использования амортизационных отчислений в народном хозяйстве. М.: Экономика, 1974. 144 с. (Госплан СССР).

11.9. **Астафьев В. Е.** Экономический эксперимент в электротехнической промышленности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.

Раздел 12

БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

12.1. Общие сведения по электробезопасности 357
Основные понятия и определения (357). Действие электрического тока на организм человека (357). Классификация электроустановок (357). Перечень основных мероприятий по электробезопасности (согласно ПУЭ) (358).
12.2. Безопасность электрооборудования. Безопасная техника 359
12.3. Блокировки в распределительных устройствах (РУ) 361
12.4. Применение заземляющих разъединителей 361
12.5. Защита от воздействия электромагнитных полей 362
12.6. Защита от воздействия статического электричества 363
12.7. Безопасные габариты проходов и проездов в распределительных устройствах 365
12.8. Защитное отключение электроустановок 365
12.9. Заземление и зануление электроустановок 367
Основные определения (367). Части электрооборудования, подлежащие заземлению (368). Нормирование параметров заземлений (368). Заземлители, заземляю-

щие и нулевые проводники (369). Учет естественных заземлителей (370). Расчеты, выполняемые при проектировании ЗУ (370). Определение коэффициентов прикосновения внутри контуров (374). Проверка выбранных заземляющих и нулевых защитных проводников (375). Заземление и зануление переносных электроприемников (376).

12.10. Средства защиты, используемые в электроустановках 377
12.11. Электрооборудование пожароопасных зон 377
Выбор электрооборудования для пожароопасных зон (378). Электропроводки, токопроводы, воздушные и кабельные линии (379).
Список литературы 380

12.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Основные понятия и определения

Электробезопасность по ГОСТ 12.1.009-76 — система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от опасного и вредного воздействия на человека электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Поражение человека воздействием электрического тока или электрической дуги *(электротравма)* возможно в случаях:

однофазного (однополюсного) прикосновения неизолированного от земли человека к неизолированным токоведущим частям электроустановки, находящейся под напряжением;

одновременного прикосновения человека к двум токоведущим неизолированным частям электроустановки, находящейся под напряжением;

приближения на опасное расстояние человека не изолированного от земли (основания) к токоведущим, не защищенным изоляцией частям электроустановки, находящейся под напряжением;

прикосновения человека, не изолированного от земли (основания), к металлическим корпусам электрооборудования, оказавшимся случайно под напряжением;

включения человека, находящегося в зоне растекания тока при замыкании на землю в электрической сети, на напряжение шага;

прохождения тока молнии при грозовом разряде;

прохождения импульсного тока при быстром разряде электрической емкости;

воздействии пламени электрической дуги;

в процессе освобождения человека, оказавшегося под напряжением, без применения индивидуальных средств защиты.

Ток замыкания — ток, стекающий в землю через место замыкания.

Зона растекания — зона, за пределами которой электрический потенциал, обусловленный током замыкания, может быть условно принят равным нулю.

Напряжением относительно земли при замыкании на корпус называется напряжение между этим корпусом и зоной нулевого потенциала.

Напряжение прикосновения — напряжение между двумя точками цепи тока замыкания на землю (на корпус) при одновременном прикосновении к ним человека (в расчетах — напряжение на теле человека $U_т$).

Напряжение шага — напряжение между двумя точками земли, обусловленное растеканием тока замыкания на землю, при одновременном касании их ногами человека.

Действие электрического тока на организм человека

Электрический ток, проходя через тело человека, производит термическое, химическое и биологическое воздействия на его органы и ткани, чем нарушает нормальную их жизнедеятельность. Биологическое действие электрического тока проявляется в опасном возбуждении живых клеток организма, в частности нервных клеток и всей нервной системы, которое характеризуется как «электрический удар». Такое возбуждение нервной системы может сопровождаться явлениями паралича мышц грудной клетки (дыхательных мышц) и паралича сердечных мышц (фибрилляция мышц желудочков сердца). В результате паралича дыхания и сердечной деятельности при поражении человека электрическим током возможен смертельный исход такого несчастного случая. Степень поражения человека и тяжесть исхода электрического удара зависят главным образом от значения тока, проходящего через тело человека, пути прохождения тока и длительности его воздействия.

Зависимость допустимых для человека значений токов от продолжительности воздействия показана графически на рис. 12.1.

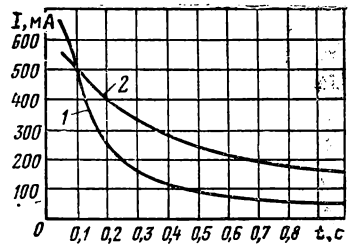


Рис. 12.1. Допустимое для человека значение тока в зависимости от продолжительности воздействия: *1* — переменный ток 50 Гц; *2* — постоянный ток

Классификация электроустановок

Электроустановки в отношении принимаемых мер безопасности разделяются [12.1] на:

электроустановки напряжением выше 1000 В в сетях с эффективно заземленной нейтралью (с большими токами замыкания на землю);

электроустановки напряжением выше 1000 В в сетях с изолированной нейтралью (с малыми токами замыкания на землю);

электроустановки напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью;

электроустановки напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью.

Электрической сетью с эффективно заземленной нейтралью называется трехфазная

электрическая сеть напряжением выше 1000 В, в которой коэффициент замыкания на землю не превышает 1,4 [1].

Глухозаземленной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление (например, через трансформатор тока).

Изолированной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через приборы сигнализации, измерения, защиты, заземляющие дугогасящие реакторы и подобные им устройства, имеющие большое сопротивление.

Заземляющим устройством называется совокупность заземлителя и заземляющих проводников. Заземлитель — проводник (электрод) или совокупность металлически соединенных между собой проводников, находящихся в соприкосновении с землей.

В отношении защиты изоляции электроустановок и принимаемых мер электробезопасности помещения, в которых может быть установлено электрооборудование (в том числе и электропомещения), разделяются на следующие виды:

сухие (относительная влажность не превышает 60%);

влажные (относительная влажность более 60, но не превышает 75 %);

особо сырые (относительная влажность близка к 100 %, предметы покрываются влагой);

жаркие (температура постоянно или периодически более 1 сут превышает +35 °С);

пыльные (выделяется технологическая пыль, которая может оседать);

с химически активной или органической средой (постоянно или в течение длительного времени содержатся агрессивные пары, газы, жидкости, образующие отложения или плесень, действующие разрушающе на изоляцию и токоведущие части электрооборудования).

Электропомещениями называются помещения или отгороженные, например, сетками, части помещения, доступные только для квалифицированного обслуживающего персонала, в которых расположены электроустановки.

В отношении опасности поражения людей электрическим током все помещения разделяются на следующие виды:

1. *Помещения без повышенной опасности* (в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность согласно пп. 2 и 3).

2. *Помещения с повышенной опасностью,* характеризующиеся наличием одного из следующих условий, создающих повышенную опасность;

а) сырости или токопроводящей пыли;

б) токопроводящих полов (металлические, железобетонные, земляные);

в) высокой температуры;

г) возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т. п. и к металлическим корпусам электрооборудования.

3. *Особо опасные помещения,* характеризующиеся наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность:

а) особой сырости;

б) химически активной среды или органической среды;

в) одновременно двух или более условий повышенной опасности.

По условиям электробезопасности для промышленных электроустановок рекомендуются номинальные напряжения согласно табл. 12.1.

В производственных помещениях допускается использование напряжения до 1000 В при условии, что электрооборудование имеет защищенное исполнение. Применение напряжения выше 1000 В допускается, если электрооборудование имеет закрытое исполнение или специальные ограждения, для снятия которых необходим инструмент, или ограждения, при снятии которых автоматически снимается напряжение с токоведущих частей.

Таблица 12.1. **Рекомендуемые напряжения для электроприемников**

Напряжение, В	Область применения
12	Для ручных светильников и электроинструмента, применяемых в особо опасных помещениях
42 (36)	Для тех же целей — в помещениях с повышенной опасностью, а также для стационарных светильников, подвешенных ниже 2,5 м над полом, — в помещениях особо опасных и с повышенной опасностью
65	Для дуговой электрической сварки
220	Для стационарных осветительных установок
220, 380, 660	Для электроприводов, электротермических и других электротехнологических установок

Перечень основных мероприятий по электробезопасности (согласно ПУЭ)

Защита от случайного прикосновения к частям электрооборудования, находящимся под напряжением.

Применение блокировок электрических аппаратов и ограждений токоведущих частей.

Установка в распределительных устройствах заземляющих разъединителей.

Устройство защитного отключения электроустановок.

Заземление или зануление электроустановок. Выравнивание электрических потенциалов на поверхности пола (земли) в зоне обслуживания электроустановок.

Применение разделяющих трансформаторов. Применение малых напряжений.

Применение устройств предупредительной сигнализации.

Защита персонала от воздействия электромагнитных полей промышленной частоты и установок ВЧ.

Использование коллективных и индивидуальных средств защиты, в том числе электрозащитных средств.

[1] Коэффициентом замыкания на землю в трехфазной электрической сети называется отношение разности потенциалов между неповрежденной фазой и землей в точке замыкания на землю другой или двух других фаз к разности потенциалов между фазой и землей в этой точке до замыкания.

Выполнение требований системы стандартов безопасности труда.

12.2. БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ. БЕЗОПАСНАЯ ТЕХНИКА

В системе стандартов безопасности труда (ССБТ) предусмотрена подсистема (2) стандартов на электротехнические изделия (электрооборудование) — всего 15 стандартов.

ГОСТ 12.2.007.0-75 «ССБТ. Общие требования безопасности» распространяется на все электротехнические изделия, кроме изделий, выполненных в виде комплексов, а также входящих в состав взрывозащищенного электрооборудования, электрооборудования морских и речных судов, электровозов и бытовых электроприборов. Он устанавливает требования безопасности, предотвращающие или уменьшающие до допустимого уровня воздействие на человека:

электрического тока;

электрической искры и дуги;

движущихся частей изделия;

частей изделия, нагревающихся до высоких температур;

опасных и вредных материалов, используемых в конструкции изделия, а также опасных и вредных веществ, выделяющихся при его эксплуатации;

шума и ультразвука;

вибрации;

электромагнитных полей, теплового, оптического и рентгеновского излучения.

ГОСТ 12.2.007.1-75 «ССБТ. Машины электрические вращающиеся. Требования безопасности». В стандарте приведены общие требования к электрическим машинам и к отдельным видам электрических машин. Даны указания в отношении элемента для заземления, конструкции подшипниковых узлов, щеточного аппарата, защитных мер против случайных прикосновений к токоведущим частям.

Предъявляются дополнительные требования безопасности к турбогенераторам, гидрогенераторам и синхронным компенсаторам, которые обусловливают:

нормы сопротивления изоляции подшипников со стороны контактных колец относительно корпуса;

устройство элементов для заземления корпусов и внешних трубопроводов, а также цвета их окраски;

расположение сигнальных ламп для систем водородного охлаждения;

вентиляцию мест возможного скопления водорода;

конструкции газопроводов и сливных маслопроводов;

изоляцию цепей термометров сопротивления и других датчиков;

освещение смотровых стекол сливных патрубков;

наличие дверей и лазов в конструкции гидрогенераторов;

конструкции подвода кабеля к аппарату щеткодержателя и оконцевание проводов внутрипанельной вторичной коммутации шкафов, сборок и устройств систем возбуждения.

Дополнительные требования к тяговым электрическим машинам включают:

а) меры против самоотвинчивания гаек в коробках выводов;

б) устройство, предотвращающее падение в случае поломки основных приливов подвески;

в) устройство нижнего люка в корпусе, обеспечивающее удобство обслуживания машины.

ГОСТ 12.2.007.2-75 ССБТ. Трансформаторы силовые и реакторы электрические. Требования безопасности». Для сухих однофазных трансформаторов мощностью до 4 кВ·А и трехфазных мощностью до 5 кВ·А напряжением до 1000 В стандарт предъявляет требования по классам и степеням защиты в соответствии с ГОСТ 12.2.007.0-75 и ГОСТ 14254-80.

Кроме того, даны указания для устройства отверстий в оболочках для доступа к токоведущим частям и заземления нетоковедущих частей токопроводящих деталей, а также о воздушных зазорах и путях утечки тока по изоляции.

Для однофазных трансформаторов мощностью свыше 4 кВ·А и трехфазных свыше 5 кВ·А и электрических реакторов стандарт содержит дополнительные требования к:

коробкам зажимов для цепей защиты и сигнализации или встроенных трансформаторов тока;

лестницам для обслуживания трансформаторов и реакторов высотой более 3 м. Кроме того, изложены условия безопасной работы при монтаже, ремонте и осмотре трансформатора или реактора и противопожарные меры для масляных трансформаторов и реакторов;

окраске внешних токоведущих частей переключающих устройств при напряжении выше 1000 В;

элементам для заземления;

защитному устройству, предупреждающему повреждение бака при внезапном повышении внутреннего давления;

газовой защите;

расположению указателей уровня масла, газового реле, крана для отбора масла, обеспечивающих безопасные условия для доступа к ним без снятия напряжения.

ГОСТ 12.2.007.3-75 ССБТ. Электрические устройства на напряжение свыше 1000 В. Требования безопасности». Общие требования предусматривают:

а) соответствие ГОСТ 12.2.007.0-75;

б) прочность изоляции устройств по ГОСТ 1516.1-76;

в) длину пути утечки по внешней изоляции устройства по ГОСТ 9920-75;

г) наличие болта для заземления.

Перечисляются требования к отдельным видам устройств, в частности к выключателям, разъединителям, отделителям, предохранителям, вентильным разрядникам, трубчатым разрядникам и трансформаторам тока.

Требования к выключателям: необходимость указателей включенного положения; указателей уровня масла и устройства для опускания и поднимания бака или лаза для доступа внутрь бака; резервуаров воздушных и вакуумных выключателей; приводов; безопасные условия доливки масла в баки.

Для разъединителей указаны требования к: блокировкам главных и заземляющих ножей; размерам рукояток ручных рычажных приводов и допустимых усилиях для оператора; по фиксации положения механизма и его указателям для ручных приводов.

Приведены требования к блокировкам отделителей.

Для предохранителей указаны требования в части предупреждения выброса пламени; состояния контактов; требования к конструкции, обеспечивающей замену их под напряжением и возможность визуального определения расплавления плавкой вставки или при помощи указателей срабатывания.

Для вентильных разрядников даны указания о предохранительном устройстве, исключающем возможность повышения давления до опасных значений, а также требования в отношении присоединения регистратора срабатывания.

Для трубчатых разрядников приведены требования к конструкции, обеспечивающей возможность крепления за открытую и закрытую концевые обоймы и проверки диаметра дугогасительного канала.

Для трансформаторов тока изложены требования в отношении предупредительных знаков о возможности появления опасного напряжения на разомкнутой вторичной обмотке, конструкции зажимов, обеспечивающих безопасное наложение перемычки на них.

ГОСТ 12.2.007.4-75 «ССБТ. Шкафы комплектных распределительных устройств и комплектных трансформаторных подстанций. Требования безопасности». В стандарте указаны общие требования согласно ГОСТ 12.2.007.0-75 и ГОСТ 14254-80 и специальные требования к шкафам КРУ и КТП. Для шкафов КРУ даны требования к следующим элементам конструкций:

местному освещению;

блокировкам разъединителей с ножами заземления, выключателями и выдвижными элементами и ограждениями;

устройствам для запирания автоматических шторок на период ремонтных работ.

Приведены нормы тяговых усилий при перемещении выдвижных элементов и даны указания по окраске приводов заземляющих ножей.

Для шкафов КТП даны указания по:

механической прочности шкафов;

всем видам блокировок разъединителей и выключателей;

конструкции сетчатых ограждений;

изоляции первичных и вторичных цепей;

сигнализации состояний «Включено» и «Отключено»;

расположению рукояток приводов, аппаратуры управления и приборов измерения и сигнализации;

заземлению кожухов шинопроводов от трансформатора;

защите рубильников с ручным управлением;

приспособлениям для запирания рукояток приводов;

требованиям к термической и электродинамической стойкости выбираемых аппаратов, приборов, токоведущих частей, изолирующих опор, креплений, несущих конструкций, обеспечивающих безопасность обслуживающего персонала при возникновении перегрева, электрической дуги и выброса из аппаратов газов и масла;

установке разъединителей во вводных шкафах КТП, обеспечивающих видимый разрыв цепи;

расположению предохранителей и рядов зажимов вторичных соединений, обеспечивающему безопасный осмотр их, проверку и испытания измерительных и релейных устройств без снятия напряжения с магистралей шин вторичных соединений.

ГОСТ 12.2.007.5-75. «ССБТ. Конденсаторы силовые. Установки конденсаторные. Требования безопасности». Общие требования заключаются в необходимости:

соблюдать требования ГОСТ 12.2.007.0-75;

герметичности корпусов конденсаторов;

наличия устройств для заземления корпуса и для разряда отключенного конденсатора.

К конденсаторам для повышения коэффициента мощности и для продольной компенсации предъявляются следующие дополнительные требования:

наличие защиты встроенными плавкими предохранителями;

непревышение максимального времени разряда конденсатора встроенными разрядными резисторами.

К конденсаторным установкам предъявляются требования:

необходимости запирания дверей ячеек на замок;

блокировок дверей;

блокировок разъединителей и выключателей;

групповой и индивидуальной защиты от токов короткого замыкания;

применения разъединителей с заземляющими ножами (для конденсаторных установок на напряжения выше 1000 В);

наличия заземляющих элементов;

сигнализации наличия напряжения на конденсаторной установке;

параметров разрядных устройств;

видимого разрыва цепи при ремонтных работах;

изображения на двери вводной ячейки принципиальной схемы установки.

Приведены нормы для сопротивления изоляции цепей управления и контроля.

ГОСТ 12.2.007.6-75 «ССБТ. Аппараты электрические коммутационные на напряжение до 1000 В. Требования безопасности». Данный стандарт предусматривает:

а) выполнение требований ГОСТ 12.2.007.0-75;

б) степени защиты аппаратов по ГОСТ 14254-80;

в) допустимые температуры нагрева частей по ГОСТ 403-73;

г) необходимость сохранения цепей заземления в выдвинутых аппаратах, встраиваемых в какое-либо устройство, до отключения их токоведущих частей;

д) необходимость блокировок, не позволяющих вкатывать или выкатывать аппарат во включенном положении;

е) выбор расстояний утечки и электрических зазоров для аппаратов, встраиваемых в оболочки изделий;

ж) требования к выключателям с ручным приводом, исключающим возможность травмирования рук оператора;

г) необходимость определения опасной зоны выхлопа аппарата.

ГОСТ 12.2.007.7-75 «ССБТ. Устройства управления комплектные на напряжение до 1000 В. Требования безопасности». Стандарт распространяется на комплектные устройства управления электроприводами, предназначенными для работы от сетей напряжением до 1000 В, и предусматривает:

фиксацию положения контактов выключателей;

закрытие рабочих контактов выключателей несгораемыми кожухами;

установку на дверях только органов управления, устройств сигнализации и измерительных приборов и необходимость наличия на них заземляющих зажимов;

расположение магнитных пускателей, контакторов и выключателей, исключающее воздействие друг на друга (электрическая дуга и ее пламя).

Приведены требования к конструкции:

выводов выключателей для присоединения к ним проводников питающей сети;

реек с зажимами для присоединения цепей управления;

выводных зажимов на напряжение свыше 660 В.

Указаны способы прокладки незащищенных изолированных проводников; нормы сопротивлений изоляции цепей; требования к знакам безопасности согласно ГОСТ 12.4.026-76.

ГОСТ 12.2.007.11-75 «ССБТ. Преобразователи энергии — статические силовые. Требования безопасности». Стандарт содержит общие и дополнительные указания

о необходимости блокировок дверей шкафов, препятствующих их открыванию при включенном состоянии и включению преобразователя при открытых дверях;

об обеспечении безопасной проверки указателем напряжения;

об электрической прочности изоляции;

о системах жидкостного охлаждения.

Кроме вышеназванных в ССБТ действуют ГОСТ 12.2.007.8-75 «Устройства электросварочные и для плазменной обработки»; ГОСТ 12.2.007.9-75 «Электропечи»; ГОСТ 12.2.007.10-75 «Установки, генераторы и нагреватели индукционные для электротермии. Установки и генераторы ультразвуковые; ГОСТ 12.2.007.12 «Источники тока химические»; ГОСТ 12.2.007.13-75 «Изделия светотехнические»; ГОСТ 12.2.007.14-75 «Кабели и кабельная арматура».

12.3. БЛОКИРОВКИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ (РУ)

Согласно ПУЭ (4-2.24) распределительные устройства (РУ) напряжением 3 кВ и выше должны быть оборудованы оперативной блокировкой, исключающей возможность:

включения выключателей, отделителей и разъединителей на заземляющие ножи и короткозамыкатели;

включения заземляющих ножей на ошиновку, не отделенную разъединителями от ошиновки, находящейся под напряжением;

отключения и включения отделителями и разъединителями тока нагрузки, если это не предусмотрено конструкцией аппарата.

Для выполнения этих требований осуществляется блокировка между разъединителями и выключателями. Блокировки могут быть механическими (механическая связь между приводами разъединителей и выключателей), замковыми (с висячими или встроенными замками), электромагнитными (см. § 43.2) и электрическими (осуществляемыми контактами в цепях управления приводами разъединителей и выключателей).

Механические блокировки целесообразны в схемах с одной системой сборных шин при напряжениях до 10 кВ, в конструкциях РУ, допускающих осуществление коротких механических связей.

Замковые блокировки целесообразны в схемах с двумя и больше системами сборных шин и в других схемах при ручном приводе разъединителей.

Электромагнитные блокировки целесообразны в схемах с двумя и больше системами сборных шин, с шиноизбирательными разъединителями и в других схемах при разъединителях с ручными приводами.

Электрическая блокировка рекомендуется в РУ с разъединителями, имеющими дистанционное управление приводами, как это имеет место, например, в РУ 500 и 750 кВ.

На заземляющих ножах линейных разъединителей со стороны линии допускается устанавливать только механическую блокировку с приводом разъединителя и приспособление (петли, цепь) для запирания заземляющих ножей замками в отключенном положении. Приводы разъединителей, доступные для посторонних лиц, должны иметь приспособления для запирания их замками в отключенном и включенном положениях.

Для безопасного обслуживания и предотвращения ошибочных операций в комплектных распределительных устройствах (КРУ) выдвижного типа выполняются блокировки, обеспечивающие невозможность вкатывания тележки в корпус шкафа при включенном выключателе, включения выключателя при промежуточных (нефиксированных) положениях тележки и выкатывания ее из рабочего положения при включенном выключателе. Кроме того, в шкафах КРУ, оборудованных заземляющими разъединителями, выполняется блокировка, обеспечивающая невозможность вкатывания тележки в рабочее положение при включенном положении заземляющего разъединителя, а также включения его при рабочем положении тележки.

12.4. ПРИМЕНЕНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ РАЗЪЕДИНИТЕЛЕЙ

Установка разъединителей с заземляющими ножами в РУ напряжением 3 кВ и выше является одним из важнейших мероприятий по защите работающих людей на частях РУ, нормально находящихся под напряжением. Опе-

рация по закоротке и заземлению на месте работ при помощи стационарных заземляющих ножей производится значительно безопасней, проще и с меньшей затратой времени и сил, чем при помощи переносных заземлений. Поэтому использование разъединителей с заземляющими ножами является обязательным.

Место установки комплектов разъединителей с заземляющими ножами выбирается исходя из положения, что каждый участок ошиновки, который может быть отделен от общей схемы отключающими аппаратами, должен иметь один комплект разъединителей с заземляющими ножами. Такой же комплект заземляющих ножей должен иметься на стороне обмоток генераторов, трансформаторов, автотрансформаторов, трансформаторов напряжения и разрядников. Для закорачивания и заземления сборных шин заземляющие ножи должны быть предусмотрены у одного из комплектов шиноизбирательных разъединителей, на стороне, обращенной к сборным шинам.

Для обеспечения безопасной работы на выключателе разъединители, установленные по обеим его сторонам, должны иметь заземляющие разъединители на стороне, обращенной к выключателю.

Узел развилки шинных разъединителей при схеме РУ с двумя системами сборных шин при одном выключателе на цепь должен иметь заземляющие ножи у каждого из шиноизбирательных разъединителей, на стороне, обращенной к этому узлу (развилке).

Все заземляющие ножи должны иметь механическую блокировку с рабочими ножами разъединителя, запрещающую включение заземляющего ножа при включенном рабочем ноже или включение рабочего ножа при включенном заземляющем ноже.

12.5. ЗАЩИТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Источниками опасных для человека электромагнитных полей (ЭМП) промышленной частоты являются РУ и воздушные линии электропередачи напряжением 400 кВ и выше. Источники ЭМП высокой частоты (ВЧ) и ультравысокой частоты (УВЧ) — промышленные электротермические установки (индукторы, конденсаторы, фидерные линии, трансформаторы и др.).

Электромагнитное поле как носитель энергии характеризуется значениями напряженностей E электрической и H магнитной составляющих, а также частотой колебаний, Гц. В диапазоне ЭМП при частотах 300 МГц — 300 ГГц (СВЧ) существенную роль играет плотность потока энергии (Вт/м^2), значение которой нормируется.

Вредное действие ЭМП на человека состоит в том, что поглощаемая тканями энергия, превращаясь в теплоту, может вызвать опасное повышение температуры. Особенно этому подвержены органы, обладающие слабой терморегуляцией, — мозг, глаза, почки и др. Кроме теплового действия влияние ЭМП выражается в поляризации молекул тканей и ориентации их вдоль вектора электрической составляющей поля, что может вызвать нарушение их функций. Под действием ЭМП возможно торможение рефлексов центральной нервной системы (ЦНС), понижение кровяного давления, замедление сердечного ритма, изменение состава крови, помутнение хрусталика глаза.

Признаки воздействия ЭМП — головные боли, повышенная утомляемость, раздражительность, ухудшение зрения.

Наиболее эффективным способом защиты от действия ЭМП промышленной частоты является установка экранов. Экранируют либо источник, либо рабочее место. По соображениям прочности экраны изготовляют из листового металла толщиной не менее 0,5 мм или сеток. Экран необходимо заземлять. Экраны выполняют в виде шкафов или камер, кожухов, ширм, козырьков. Экраны в виде козырьков или навесов устанавливают на высоте 2—2,5 м от земли у шкафов управления воздушными выключателями или их приводов, на участках пребывания электротехнического персонала, производящего осмотры и ремонт электрооборудования открытых подстанций и линий электропередачи. Если коллективные меры защиты окажутся недостаточными, то необходимо применять экранирующие костюмы (см. табл. 12.8).

Особенности производства работ на подстанциях и в зоне влияния воздушных линий напряжением 400, 500 и 750 кВ изложены в «Нормах и правилах по охране труда при работах на подстанциях и воздушных линиях электропередачи напряжением 400—750 кВ переменного тока промышленной частоты» (утвержденных 7 октября 1970 г.).

Для измерения напряженности электрической и магнитной составляющих ЭМП ВЧ и УВЧ служит прибор ИЭМП-Т, предназначенный для измерения действующего значения

Таблица 12.2. Допустимая напряженность и продолжительность пребывания человека в электрическом поле без средств защиты

Напряженность электрического поля, кВ/м	Допустимая продолжительность пребывания человека в течение суток в электрическом поле, мин	Примечание
Менее 5	Без ограничений	Нормативы действительны при условии, что: остальное время рабочего дня человек находится в местах, где напряженность электрического поля меньше 5 кВ/м; исключена возможность воздействия на организм человека электрических разрядов
От 5 до 10	$\leqslant 180$	
Свыше 10 до 15	$\leqslant 90$	
Свыше 15 до 20	$\leqslant 10$	
Свыше 20 до 25	$\leqslant 5$	

напряженности электрического поля в пределах 4—1500 В/м в диапазоне частот 100 кГц — 30 МГц; 1—600 В/м в диапазоне частот 20—300 МГц, а также напряженности магнитного поля в пределах 0,5—300 А/м в диапазоне частот 100 кГц — 1,5 МГц.

Для измерения напряженности электрического поля промышленной частоты служит прибор ИНЭП-50.

Согласно ГОСТ 12.1.002-75 «ССБТ. Электрические поля токов промышленной частоты напряжением 400 кВ и выше. Общие требования безопасности» облучение электрическим полем регламентируется как по напряженности, так и продолжительности действия (табл. 12.2).

Согласно ГОСТ 12.1.006-76 «ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности» нормируемыми параметрами в диапазоне частот 60 кГц — 300 МГц являются напряженности E и H. В диапазоне 300 МГц — 300 ГГц нормируется плотность потока энергии, Вт/м^2.

Предельно допустимая напряженность ЭМП на рабочих местах и в местах возможного нахождения персонала не должна превышать в течение рабочего дня следующих значений:

по электрической составляющей:

f, МГц	0,06—3	3,0—30,0	30—50	50—300
E, В/м	50	20	10	5

по магнитной составляющей:

f, МГц	0,06—1,5	30—50
H, А/м	5	0,3

12.6. ЗАЩИТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Статическим электричеством (по ГОСТ 12.1.018-79) называется совокупность явлений, связанных с возникновением, сохранением и релаксацией свободного электрического заряда на поверхности и в объеме диэлектрических и полупроводниковых веществ, материалов, изделий или на изолированных (в том числе диспергированных в диэлектрической среде) проводниках. Электростатические заряды могут возникать: при соприкосновении или трении твердых материалов; при размельчении или пересыпании однородных и неоднородных материалов — диэлектриков; при разбрызгивании диэлектрических жидкостей; при транспортировании сыпучих веществ и жидкостей по трубам; при фильтрации жидкостей и др.

В условиях производств статическая электризация проявляется при работе ременных передач и ленточных транспортеров; при перематывании и обработке тканей, бумаги, полимерных пленок; при размоле и просеивании сыпучих материалов; при движении нефтепродуктов по трубопроводам; в процессе слива, налива и перекачивания нефтепродуктов из одной емкости в другую и т. п. При относительной влажности воздуха 85 % и выше электростатическая электризация не наблюдается. При интенсивной электризации электрические потенциалы на заряженных телах могут достигать значений 20—50 кВ, что при разряде создает опасность воспламенения горючих паров или газов.

Электрические заряды на частях производственного оборудования могут взаимно нейтрализоваться благодаря некоторой электрической проводимости влажного воздуха. При низкой влажности (сухой, чистый воздух) и накоплении значительных зарядов может произойти искровой разряд между разноименно заряженными телами, а также на заземленное оборудование. При этом энергии искры может оказаться достаточно для воспламенения горючей или взрывоопасной смеси. Так, для воспламенения газопаровоздушной смеси ацетилена достаточно искры с энергией 0,011, бензина Б-70 — 0,16, метана — 0,29, этилового спирта — 0,14 мДж.

Электростатическая искробезопасность (ЭСИБ) должна обеспечиваться устранением искровых разрядов статического электричества, способных стать источником воспламенения горючих веществ, в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.018-79 «ССБТ. Статическое электричество. Искробезопасность».

В ряде случаев статическая электризация тела человека и затем последующие разряды с человека на землю или заземленное производственное оборудование, а также электрический разряд с незаземленного оборудования через тело человека могут вызвать болевые и нервные ощущения, быть причиной непроизвольного резкого движения человека, в результате которого не исключена механическая травма (падение, ушиб, ранение).

Устранение опасности возникновения зарядов. Меры подавления электростатических зарядов имеют целью предупредить опасность пожара или взрыва, а также защитить обслуживающий производственный персонал от нежелательного воздействия токов разряда на организм. Защитные меры против проявления статического электричества регламентированы [12.6]; к ним относятся:

увеличение электрической проводимости веществ и материалов, генерирующих заряды;

снижение интенсивности возникновения зарядов;

нейтрализация возникающих зарядов;

отвод электрических зарядов, возникающих на теле людей;

заземление металлических объектов оборудования и коммуникаций.

Заземление оборудования устраняет формирование электрических зарядов и последующий разряд их с проводящих элементов оборудования на землю. Заземлять следует не только те части оборудования, которые участвуют в генерировании зарядов, но и все другие изолированные от земли электропроводящие элементы, которые могут зарядиться вследствие электростатической индукции. Заземлять следует, например, такие технологические машины и аппараты, как смесители, вальцы и каландры при производстве резинотехнических изделий и пластмасс, компрессоры, насосы и фильтры, сушилки и сублиматоры, абсорберы, реакторы, мельницы, транспортеры, сливно-наливные устройства для нефтепродуктов и т. п.

Сопротивление заземляющих устройств (ЗУ) допускается до 100 Ом. Заземление для защиты от статического электричества рекомендуется объединять с ЗУ электроустановок и молниезащитой. Все соединения проводни-

ков в ЗУ должны выполняться сваркой. Каждую систему аппаратов и трубопроводов в пределах цеха следует заземлять не менее чем в двух местах. То же относится к резервуарам вместимостью более 50 м³.

Обязательному заземлению подлежат наливные стояки эстакад, рельсы в пределах сливного фронта, цистерны или наливные суда, находящиеся под наливом (сливом) сжиженных горючих газов и пожароопасных жидкостей.

Резиновые шланги с металлическими наконечниками для налива нефтепродуктов в цистерны, наливные суда, бочки и т. п. следует заземлять медной проволокой, навитой снаружи или внутри шланга с припайкой одного ее конца к металлическим частям продуктопровода, а другого — к наконечнику шланга.

Для выравнивания потенциалов и предотвращения искрения все параллельно расположенные трубопроводы в производственных помещениях и специальных каналах на расстоянии до 10 см друг от друга соединяют перемычками через каждые 20—25 м.

Если заземлением оборудования не удается предотвратить накопление зарядов, то следует принимать меры по уменьшению объемных и поверхностных сопротивлений материалов, генерирующих заряды. Это достигается повышением относительной влажности окружающего воздуха сверх 65 % и самого обрабатываемого материала, химической обработкой, применением антистатических присадок, нанесением электропроводящих пленок.

Для увеличения проводимости жидких диэлектриков в них вводят растворимые присадки, например до 0,01 % солей высших карбоновых, нафтеновых и синтетических жирных кислот.

Снижение интенсивности электростатической электризации может быть достигнуто соответствующей оптимальной скоростью движения веществ (для нефтепродуктов порядка 1 м/с), исключением разбрызгивания жидкостей, распыления, подбором поверхностей трения, очисткой горючих жидкостей и газов от примесей.

Налив жидкостей в резервуары, цистерны и тару свободно падающей струей не допускается. Сливную трубу следует удлинить до дна приемного сосуда и направить струю жидкости вдоль стенки. В начале заполнения резервуара жидкость подают с пониженной скоростью около 0,5—0,7 м/с.

Нейтрализация электростатических зарядов может осуществляться путем ионизации слоя воздуха, разделяющего заряженные тела. Применяют ионизаторы: индукционные, высоковольтные, радиоизотопные и комбинированные.

Индукционные ионизаторы работают на принципе электростатической индукции. Они создают вблизи заряженного тела электрическое поле большой напряженности; при этом

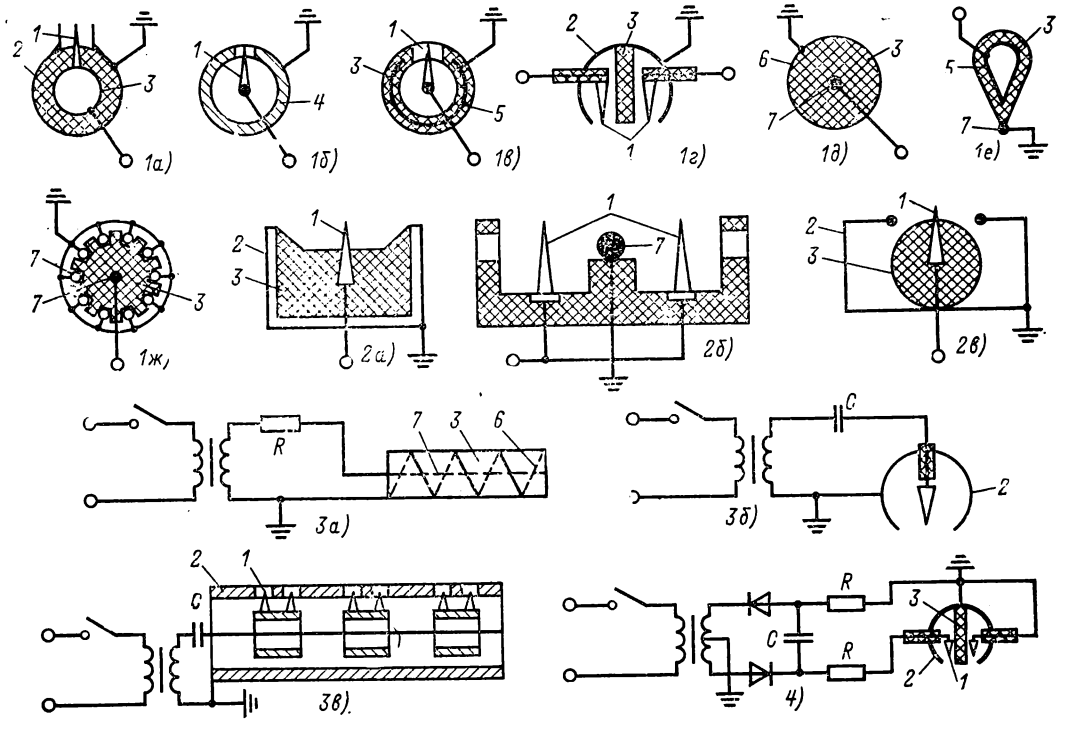


Рис. 12.2. Конструкции и схемы включения высоковольтных нейтрализаторов:

конструкции: *1а—1ж* — трубчатая; *2а—2в* — желобковые; схемы включения: *3а—3в* — на переменном токе промышленной частоты (*3а* — ограничение тока короткого замыкания активным сопротивлением; *3б* и *3в* — емкостным сопротивлением); *4* — на постоянном токе; *1* — игла-электрод; *2* — металлическая оболочка-электрод; *3* — диэлектрический стержень; *4* — металлическая труба-электрод; *5* — металлический вкладыш-электрод; *6* — проволока-электрод; *7* — металлический стержень-электрод

вблизи электродов-ионизаторов образуется коронный электрический разряд, ионизирующий воздушный промежуток. Образовавшиеся ионы воздуха притягиваются к поверхности тела и нейтрализуют его электрический заряд. Индукционные ионизаторы выполняют в виде несущих стержней, на которых укреплены иглообразные или щеточные стальные электроды.

На электроды высоковольтных ионизаторов (аналогичной конструкции) подается переменное напряжение промышленной или высокой частоты 4—15 кВ либо выпрямленное напряжение. Конструкции и схемы включения высоковольтных нейтрализаторов показаны на рис. 12.2.

Радиоизотопные нейтрализаторы применяют во взрывоопасных производствах химической промышленности, в производстве лавсановой и полиэтиленовой пленки, бумаги, тканей и т. п. Они просты в конструктивном отношении и не требуют источников электропитания.

Наибольшей ионизирующей способностью обладают нейтрализаторы с α-излучением. Глубина проникновения α-частиц в воздухе около 2,5—3,5 см, что делает безопасным применение этого вида излучения для обслуживающего персонала.

На рис. 12.3 изображены схематически радиоактивные нейтрализаторы на основе плутония Pu^{239}. Нейтрализатор состоит из металлического контейнера, в котором расположены держатели источников радиации, которые могут поворачиваться на 180°. В рабочем положении активная поверхность источника излучения обращена к наэлектризованному объекту через окно в контейнере.

В комбинированных нейтрализаторах, например, типов НРИ-3 и НРИ-5 в общем кожухе совмещены радиационный и индукционный нейтрализаторы.

В аэродинамических нейтрализаторах ионы, полученные в ионизационной камере, подаются в зону нейтрализации зарядов потоком воздуха.

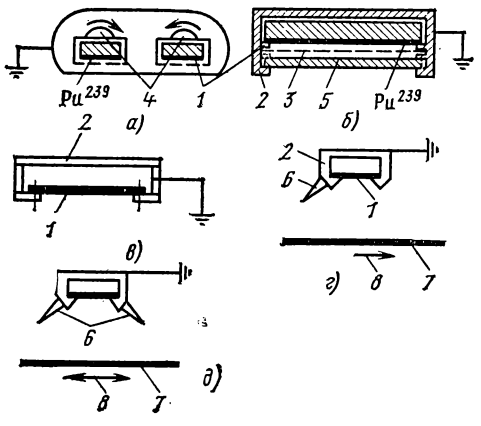


Рис. 12.3. Радиоактивные и радиоактивно-индукционные нейтрализаторы:

а, б — радиоактивные с α-излучающими источниками; *в—с* β-излучающими источниками; *г, д* — радиоактивно-индукционный; *1* — активный препарат; *2* — металлический контейнер; *3* — металлическая сетка; *4* — рукоятка; *5* — экран; *6* — игла; *7* — наэлектризованный материал; *8* — направление движения материала

Отвод электростатических зарядов с тела человека осуществляется путем устройства электропроводящих полов в рабочих помещениях, специальных помостов и рабочих площадок, заземления ручек дверей, поручней лестниц, рукояток приборов и аппаратов, а также ношением токопроводящей обуви и антистатических халатов.

12.7 БЕЗОПАСНЫЕ ГАБАРИТЫ ПРОХОДОВ И ПРОЕЗДОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

При проектировании РУ в целях электробезопасности необходимо обеспечить достаточную ширину и высоту проходов и проездов. Эти расстояния приведены в табл. 12.3.

12.8. ЗАЩИТНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Защитным отключением называется система защиты, обеспечивающая автоматическое отключение всех фаз или полюсов аварийного участка сети с напряжением до 1000 В с полным временем отключения с момента возникновения однофазного замыкания не более 0,2 с.

Отключение электроустановок при замыканиях на корпус (защитное отключение) может осуществляться устройствами, автоматически снимающими напряжение с электроустановки, применяемыми в следующих случаях:

а) в электроустановках с изолированной нейтралью, к которым предъявляются повышенные требования в отношении безопасности, в дополнение к заземлению (торфопредприятия, угольные шахты и т. п.);

б) в электроустановках с глухозаземленней нейтралью до 1000 В взамен присоединения корпусов оборудования к заземленной нейтрали, если выполнение этого присоединения встречает затруднения; при этом защищаемая установка должна иметь заземляющее устройство, удовлетворяющее требованиям к электроустановкам с изолированной нейтралью;

в) в передвижных установках, если заземление их не может быть выполнено в объеме требований ПУЭ.

В зависимости от входной величины устройства защитного отключения подразделяются на устройства, реагирующие на:

1) напряжение корпуса относительно земли;

2) ток замыкания на землю;

3) напряжение нулевой последовательности;

4) напряжение фазы относительно земли;

5) ток нулевой последовательности.

1. *Схема с реакцией на напряжение корпуса относительно земли.* В этой схеме датчиком служит реле напряжения *KV*, включенное между корпусом электрооборудования и вспомогательным заземлителем (рис. 12.4). Схема может быть использована в сетях с изолированной и глухозаземленной нейтралью любого напряжения. Защита срабатывает при за-

Таблица 12.3. **Безопасные габариты проходов и проездов РУ**

Наименование РУ или подстанции	Назначение прохода (проезда)	Ширина или высота не менее, м
РУ, установленные в электропомещениях	Проходы обслуживания электроустановок с лицевой и с задней стороны щитов управления:	
	ширина в свету	0,8
	высота в свету	1,9
	Расстояния от наиболее выступающих неогражденных неизолированных токоведущих частей по одну сторону прохода до противоположных стены или оборудования, не имеющего неогражденных неизолированных токоведущих частей:	
	при напряжении ниже 660 В и длине щита до 7 м	1
	то же при длине щита более 7 м	1,2
	то же при напряжении 660 В и выше	1,5
ОРУ и РУ и подстанции напряжением выше 1000 В	Проезд в ОРУ напряжением выше 110 кВ вдоль выключателей для передвижных механизмов:	
	ширина	4
	высота	4
	То же для трансформаторов, ширина	3
ЗРУ	Ширина коридора обслуживания (считая в свету между ограждениями):	
	при одностороннем расположении оборудования	1
	при двустороннем расположении оборудования	1,2
	То же при наличии в коридоре приводов коммутационных аппаратов:	
	при одностороннем расположении	1,5
	при двустороннем расположении	2,0
	Ширина взрывного коридора	1,2
КРУ и КТП	Ширина прохода вдоль КРУ и КТП	1,0
	При установке КРУ и КТП в отдельных помещениях ширина прохода для управления и ремонта:	
	для однорядного исполнения	Длина тележки плюс 0,6
	для двухрядного исполнения	Длина тележки плюс 0,8

мыкании на корпус. При замыкании одной фазы в электроприемнике на его корпус и при неотключении электроприемника защитой от однофазных коротких замыканий (для сети с глухозаземленной нейтралью) напряжение корпуса электроприемника относительно земли окажется выше напряжения на дополнительном заземлителе, тогда реле защиты сработает, замкнет цепь электромагнита отключения *YAT* выключателя *Q*, после чего произойдет отключение от сети электроприемника с поврежденной изоляцией.

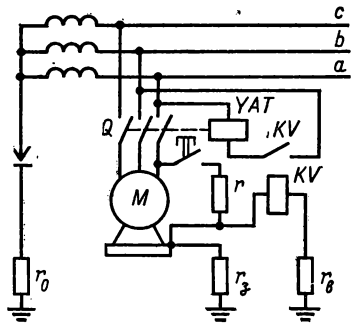


Рис. 12.4. Схема защитного отключения с реакцией на напряжение корпуса относительно земли

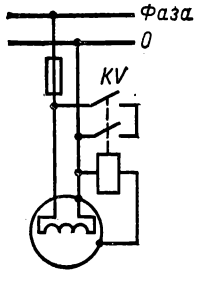


Рис. 12.5. Включение реле напряжения между корпусом электроприемника и нулевым проводом

В сети напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью реле *KV* включается между корпусом и нулевым проводом (рис. 12.5). При срабатывании реле его контакты замыкают цепь накоротко, отчего перегорает плавкая вставка предохранителя и с поврежденного электрического аппарата или машины снимается напряжение. Достоинством этой схемы является то, что сечение провода, соединяющего корпус электроприемника через обмотку реле *KV* с нулевым проводом сети, может быть небольшим, а ток короткого замыкания после срабатывания реле будет достаточно велик для перегорания вставки предохранителя.

2. *Схема защитного отключения с реакцией на ток замыкания на землю.* Токовое реле *KA* включено в рассечку заземляющего провода (рис. 12.6). При прохождении тока на землю, превышающего некоторое предельно допустимое значение, произойдет срабатывание реле, а его контакты замкнут цепь электромагнита отключения *YAT* выключателя (автомат, контактор). Эта схема осуществляет отключение при замыкании на землю (корпус) в сетях как с изолированной, так и с заземленной нейтралью при любом номинальном напряжении.

3. *Схема с реакцией на напряжение фазы относительно земли.* Реле минимального напряжения *1KV—3KV* (датчики) включены между фазами и землей (рис. 12.7). При исправной изоляции всех фаз (проводимости

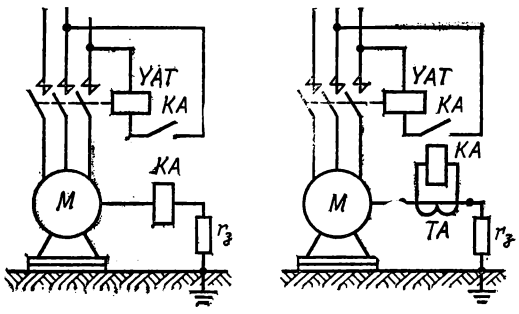


Рис. 12.6. Принципиальная схема защитного отключения с реакцией на ток замыкания на землю

$y_a = y_b = y_c \approx 0$) реле находятся под одинаковым фазным напряжением. В случае повреждения изоляции или значительного уменьшения сопротивления изоляции какой-либо фазы (например, в случае прикосновения человека к неизолированному проводу фазы *a*) возникает дополнительная проводимость фазы *a* и вследствие нарушения симметрии фазных напряжений напряжение данной фазы относительно земли уменьшается. Если напряжение данной поврежденной фазы уменьшится на столько, что окажется ниже уставки напряжения срабатывания, то реле сработает и его контакты замкнут цепь электромагнита *YAT* контактора *KM*, который отключит данную сеть.

4. *Схема с реакцией на напряжение нулевой последовательности.* Защитное отключение по этой схеме использует в качестве датчика фильтр напряжения нулевой последовательности (например, емкостный) с включенными в

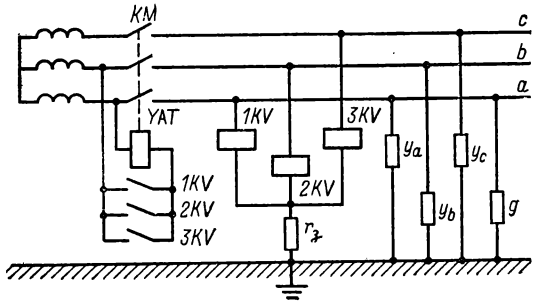


Рис. 12.7. Принципиальная схема защитного отключения с реакцией на несимметрию напряжения фаз относительно земли

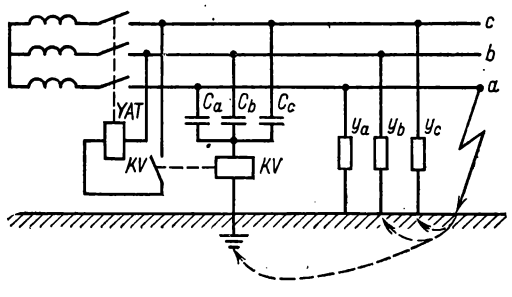


Рис. 12.8. Принципиальная схема защитного отключения с реакцией на напряжение нулевой последовательности

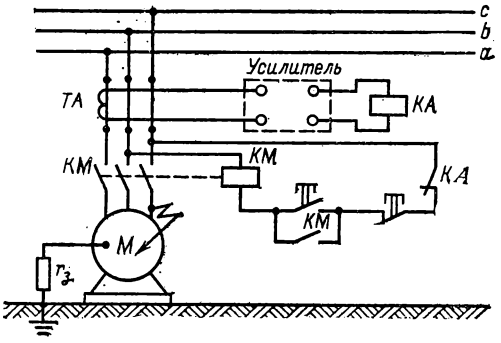


Рис. 12.9. Принципиальная схема защитного отключения с реакцией на ток нулевой последовательности

него реле максимального напряжения *KV* (рис. 12.8). При равенстве проводимостей (сопротивлений) изоляции проводов относительно земли напряжение нулевой последовательности, приложенное к обмотке реле *KV*, равно нулю. При повреждении изоляции одной из фаз и увеличении ее проводимости (а также в случае увеличения проводимости при прикосновении человека к токоведущей части фазы) симметрия фазных напряжений нарушается и появляется напряжение, тем большее, чем больше проводимость изоляции поврежденной фазы. В результате реле срабатывает и отключает установку.

5. *Схема с реакцией на ток нулевой последовательности.* При защитном отключении по этой схеме в качестве датчика используется трансформатор тока нулевой последовательности *TA* (рис. 12.9). Магнитопровод *TA* охватывает все три провода (например, жилы кабеля) сети. К его вторичной обмотке подключается через усилитель обмотка токового реле защиты *KA*. При отсутствии в сети замыкания на землю и при равных проводимостях изоляции фаз относительно земли ток нулевой последовательности во вторичной цепи *TA* равен нулю. При замыкании фазы на землю или при прикосновении человека, стоящего на земле, к токоведущей части одной фазы нарушается симметрия токов и возникает дополнительная проводимость. Через вторичную обмотку и реле проходит усиленный ток нулевой последовательности $I_р = 3I_0/K_I$, где $3I_0$ — ток нулевой последовательности, K_I — коэффициент трансформации трансформатора тока. Этот ток вызывает срабатывание реле *KA*, контакты которого размыкают цепь питания рабочей катушки контактора *KM* и последний отключается. Защитное отключение по схеме тока нулевой последовательности может применяться в любых трехфазных сетях независимо от режима нейтрали.

12.9. ЗАЗЕМЛЕНИЕ И ЗАНУЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Основные определения

Заземлением какой-либо части электроустановки называется преднамеренное гальваническое соединение этой части с заземляющим устройством.

Защитным заземлением называется заземление частей электроустановки с целью обеспечения электробезопасности.

Рабочим заземлением называется заземление какой-либо точки токоведущих частей электроустановки, необходимое для обеспечения работы электроустановки.

Занулением в электроустановке напряжением до 1000 В называется преднамеренное соединение частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с глухозаземленной средней точкой источника в сетях постоянного тока.

Напряжением на заземляющем устройстве называется напряжение, возникающее при стекании тока с заземлителя в землю между точкой ввода тока в заземляющее устройство и зоной нулевого потенциала.

Части электрооборудования, подлежащие заземлению

Защитному заземлению (или занулению в сетях до 1000 В с глухозаземленной нейтралью) подлежат:

корпуса электрических машин, аппаратов и других электроприемников;

вторичные обмотки измерительных трансформаторов;

приводы электрических аппаратов;

металлические конструкции распределительных устройств (РУ) и щитов, кабельные конструкции и оболочки кабелей и проводов, трубы электропроводок, конструкции шинопроводов и др.;

металлические оболочки и броня контрольных и силовых кабелей переменным напряжением до 42 В и постоянным до 110 В, проложенных в общих металлических конструкциях вместе с кабелями и проводами, оболочки и броня которых подлежат заземлению (занулению).

Не требуется заземлять или занулять:

1) корпуса электрооборудования, установленного на заземленных (зануленных) металлоконструкциях, конструкциях распределительных устройств, щитах, станинах производственного оборудования;

2) металлоконструкции РУ и кабельные конструкции, на которых установлено заземленное или зануленное электрооборудование при наличии надежного контакта между ними;

3) арматуру изоляторов, оттяжек, кронштейнов и осветительных приборов при установке их на деревянных опорах воздушных линий (ВЛ) или на деревянных конструкциях открытых РУ (ОРУ);

4) съемные или открывающиеся части металлических каркасов камер РУ, шкафов, ограждений и т. п., если на съемных частях не установлено электрооборудование или если переменное напряжение установленного электрооборудования не превышает 42 В или постоянное 110 В;

6) корпуса электроприемников с двойной изоляцией.

В электроустановках напряжением выше 1000 В сетей с эффективно заземленной нейтралью заземляющие устройства следует выполнять с соблюдением требований либо к их сопротивлению, либо к напряжению прикосновения.

При любом выполнении напряжение на заземляющем устройстве при стекании с него тока замыкания на землю не должно превышать 10 кВ.

Для ЗУ, выполняемого с соблюдением требований к сопротивлению, последнее не должно превышать 0,5 Ом с учетом наличия естественных заземлителей. При этом проверки на значение напряжения прикосновения не требуется.

Нормирование параметров заземлений

Заземляющее устройство (ЗУ) — совокупность заземлителя и заземляющих проводников. Заземлитель может быть простой в виде вертикальных металлических (стальных) стержней или горизонтальных полос. Сложный заземлитель — контур, состоящий из полос и стержней, образующих сетку, охватывающий определенную площадь, на которой расположено электрооборудование.

ЗУ выполняют с соблюдением требований либо к их сопротивлению $R_з$, либо к нормированному напряжению прикосновения и ограничения напряжения на нем при протекании тока замыкания на землю $U_з = I_з R_з$.

ЗУ, выполненное с соблюдением требования ограничения напряжения прикосновения, должно обеспечивать в любое время года при стекании с заземлителя тока замыкания на землю $I_з$ значение допустимых нормированных напряжений $U_{н,т}$ на теле человека не более:

Допустимое напряжение на теле человека $U_{н,т}$, В	500	400	200	130	100	65
Продолжительность воздействия t, с	0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	3,0

В качестве расчетного времени воздействия t следует принимать сумму времени срабатывания защиты и времени отключения выключателя.

Сопротивление заземляющего устройства при этом определяется по $U_{н,т}$ и $I_з$.

ЗУ в электроустановках напряжением выше 1000 В *с изолированной нейтралью* должно иметь сопротивление растекания $R_з$, Ом:

если ЗУ одновременно используется для электроустановок напряжением до 1000 В, $R_з \leqslant 125/I_з$;

если ЗУ используется только для электроустановок напряжением выше 1000 В, то $R_з \leqslant 250/I_з$, но не более 10 Ом, где $I_з$ — расчетный ток замыкания на землю, А.

Для электроустановок напряжением до 1000 В *с глухозаземленной нейтралью* сопротивление ЗУ не должно превышать 2; 4 и 8 Ом при линейных напряжениях соответственно 660, 380 и 220 В в трехфазной сети или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока. Это сопротивление должно быть обеспечено с учетом естественных заземлителей (в том числе повторных заземлений нулевого провода).

Для электроустановок напряжением до 1000 В сети *с изолированной нейтралью* сопротивление ЗУ не должно превышать 4 Ом. При

мощности источника питания до 100 кВ·А сопротивление ЗУ может быть принято до 10 Ом.

Заземлители, заземляющие и нулевые проводники

В качестве естественных заземлителей рекомендуются проложенные в земле металлические трубопроводы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей и газов), обсадные трубы скважин, стальные и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землей, свинцовые оболочки кабелей, заземлители металлических опор ВЛ, нулевые провода ВЛ до 1000 В с повторными заземлениями в количестве не менее двух. Естественные заземлители должны быть присоединены к магистрали заземления не менее чем в двух разных местах.

В качестве искусственных заземлителей рекомендуется круглая сталь диаметром не менее 10 мм (неоцинкованная) и 6 мм (оцинкованная), стальная полоса сечением не менее 48 мм^2 при толщине не менее 4 мм или угловая сталь с толщиной полок не менее 4 мм.

По условиям механической прочности сечение стальных заземлителей может быть принято согласно табл. 12.4.

Для установок напряжением выше 1000 В сетей с эффективно заземленной нейтралью, выполняемых по нормированному сопротивлению, в целях выравнивания электрического потенциала на площадке, обслуживаемой электротехническим персоналом, и для удобства присоединения электрооборудования к заземлителю на территории ОРУ следует прокладывать продольные и поперечные горизонтальные заземлители и соединять их в сетку. Продольные заземлители должны быть проложены вдоль осей электрооборудования со стороны обслуживания на глубине 0,5—0,7 м от поверхности земли на расстоянии 0,8—1,0 м от фундамента или основания оборудования РУ. Заземляющие проводники, присоединяющие оборудование или конструкцию к заземлителям, следует прокладывать в земле на глубине не менее 0,3 м.

Поперечные заземлители следует прокладывать в удобных местах между оборудованием на глубине 0,5—0,7 м от уровня планировки. Расстояние между ними следует принимать увеличивающимся от периферии к центру сетки. При этом первое и последующие расстояния, начиная от периферии, не должны превышать соответственно 4, 5, 6, 7, 5,9, 11, 13,5 и 20 м. Размер ячеек заземляющей сетки, примыкающих к местам подсоединения к ЗУ нейтралей силовых трансформаторов и короткозамыкателей, не должен превышать 6×6 м.

Горизонтальные заземлители следует прокладывать по краю территории, занимаемой ЗУ так, чтобы они в совокупности образовали замкнутый контур.

Для электроустановок с напряжением выше 1000 В сетей с эффективно заземленной нейтралью при ЗУ, выполняемом по допустимому напряжению прикосновения, размещение продольных и поперечных горизонтальных заземлителей должно определяться требованиями ограничения напряжения прикосновения до нормированных значений. Расстояние между продольными и поперечными горизонтальными искусственными заземлителями не должно превышать 30 м, а глубина их заложения в грунте менее 0,3 м. Для снижения напряжения прикосновения у рабочих мест рекомендуется подсыпка из щебня слоем толщиной 0,1—0,2 м. Вблизи мест расположения заземляемых нейтралей силовых трансформаторов и короткозамыкателей следует прокладывать продольные и поперечные горизонтальные заземлители.

Внешнюю ограду ОРУ не рекомендуется присоединять к заземляющему устройству. Если от ОРУ отходят ВЛ напряжением 110 кВ и выше, то ограду следует заземлить с помощью вертикальных заземлителей длиной 2—3 м, установленных у стоек ограды по всему ее периметру через 20—50 м. Установка таких заземлителей не требуется для ограды с металлическими стойками и теми стойками из железобетона, арматура которых электрически соединена с металлическими звеньями ограды. Расстояние от ограды до элементов ЗУ, расположенных вдоль нее, должно быть не менее 2 м.

В открытых электроустановках напряжением выше 1000 В сетей с изолированной нейтралью вокруг площади, занимаемой оборудованием, на глубине не менее 0,5 м должен быть проложен замкнутый горизонтальный заземлитель (контур), к которому присоединяется заземляемое оборудование. Если сопротивление ЗУ выше 10 Ом (для грунта с удельным сопротивлением более 500 Ом·м), то следует дополнительно проложить горизонтальные заземлители вдоль рядов оборудования со стороны об-

Таблица 12.4. **Рекомендуемые и допускаемые сечения стальных заземлителей**

Заземлитель	Коррозионная активность грунта	Профиль заземлителя	
		рекомендуемый	допускаемый
Стальной вертикальный	Весьма высокая, высокая	Круглая ⌀ 16 мм	—
	Повышенная	Для мягких грунтов круглая ⌀ 12 мм	Уголок 63×63×6 мм
	Средняя	Для грунтов средней твердости круглая ⌀ 16 мм	То же
	Низкая	То же	Для мягких грунтов 50×50×5 мм. Для грунтов средней твердости 63×63×6 мм
Стальной горизонтальный	Весьма высокая	Круглая ⌀ 16 мм	Полоса 20×10, 30×10, 40×10 мм
	Высокая	Круглая ⌀ 14 мм	Полоса 20×8, 30×8, 40×8 мм
	Повышенная, средняя	Круглая ⌀ 12 мм	Полоса 20×6, 30×6, 40×6 мм
	Низкая	Круглая ⌀ 10 мм	Полоса 20×4, 30×4, 40×4 мм

служивания на глубине 0,5 м и на расстоянии 0,8—1 м от фундаментов и оснований.

В качестве заземляющих и нулевых защитных проводников следует использовать:

в первую очередь нулевые рабочие проводники, а также металлические конструкции зданий и сооружений, конструкции производственного назначения, стальные трубы электропроводок, алюминиевые оболочки кабелей, кожухи шинопроводов, короба и лотки электроустановок;

арматуру железобетонных строительных конструкций и фундаментов;

металлические трубопроводы всех назначений кроме трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ и смесей, канализации и центрального отопления;

специально предусматриваемые для этой цели проводники (изолированные нулевые проводники, стальная полоса или круглая сталь).

Не допускается в качестве нулевых или заземляющих проводников использовать металлические оболочки трубчатых проводов, несущие тросы электропроводок, оболочки изоляционных трубок и металлорукавов, броню и свинцовые оболочки проводов и кабелей. В помещениях и наружных установках, в которых требуется применение заземления, эти оболочки должны быть заземлены или занулены и иметь надежные соединения на всем протяжении. Металлические соединительные муфты и коробки должны быть присоединены к броне и металлическим оболочкам пайкой или болтовыми соединениями.

Ответвления от магистралей заземления к электроприемникам напряжением до 1000 В допускается прокладывать скрыто (в стене, под полом и т. п.) с защитой их от агрессивных сред. В наружных установках стальные заземляющие и нулевые защитные проводники допускается прокладывать в земле, полу или по краю площадок, фундаментов технологических установок и т. п. Не допускается прокладывать в земле неизолированные алюминиевые заземляющие или нулевые проводники.

По условиям механической прочности размеры неизолированных заземляющих и нулевых защитных проводников должны быть не менее приведенных в табл. 12.5.

Таблица 12.5. **Выбор защитных проводников**

Наименование	В зданиях	В наружных установках	В земле
Угловая сталь с толщиной полки, мм	2	2,5	4
Круглая сталь диаметром, мм	5	6	10
Полосовая сталь:			
сечение, мм²	24	48	48
толщина, мм	3	4	4
Водогазопроводные трубы с толщиной стенки, мм	2,5	2,5	3,5
Тонкостенные стальные трубы с толщиной стенки, мм	1,5	2,5	Не допускается

Примечание. Наименьшее допустимое сечение неизолированных медных проводников — 4 мм², алюминиевых — 6 мм².

Учет естественных заземлителей

При наличии в проектируемой электроустановке естественного заземлителя с сопротивлением $R_{з,е}$ требуемое (дополнительное) сопротивление искусственного заземлителя $R_{з,и}$ без учета сопротивлений линий или полос связи и взаимного их влияния составит:

а) для достижения нормированного сопротивления растекания

$$R_{з,и} = R_{з,е}R_{з,н}/(R_{з,е} - R_{з,н}),$$

где $R_{з,н}$ — нормированное сопротивление ЗУ, Ом;

б) для достижения нормированного напряжения на ЗУ

$$R_{з,и} = R_{з,е}U_{з,д}/(U_{з,е} - U_{з,д}),$$

где $U_{з,д}$ — нормированное (допустимое) напряжение на ЗУ, В; $U_{з,е}$ — напряжение на заземляющем устройстве естественного заземлителя без учета дополнительного (искусственного) заземлителя, В.

Расчеты, выполняемые при проектировании ЗУ

Сопротивление одиночных естественных ($R_{з,е}$) и искусственных ($R_{з,и}$) заземлителей определяется по формулам табл. 12.6.

Сложные искусственные заземлители с целью уменьшения их сопротивления выполняют в виде сетки из горизонтальных продольных и поперечных полос, уложенных в грунт на глубине h без вертикальных электродов, или в виде аналогичной сетки с вертикальными электродами длиной $l_в$.

Расчет сопротивления растекания сложных искусственных (и аналогичных им естественных) заземлителей может быть выполнен по следующим формулам:

а) для сетки без вертикальных электродов

$$R_{з,и} = A\Delta_h \rho_{эR}/\sqrt{S},$$

где A — коэффициент подобия (рис. 12.10); Δ_h — коэффициент, учитывающий снижение сопротивления заземлителя при заглублении сетки, принимаемый по рис. 12.11; $\rho_{эR}$ — эквива-

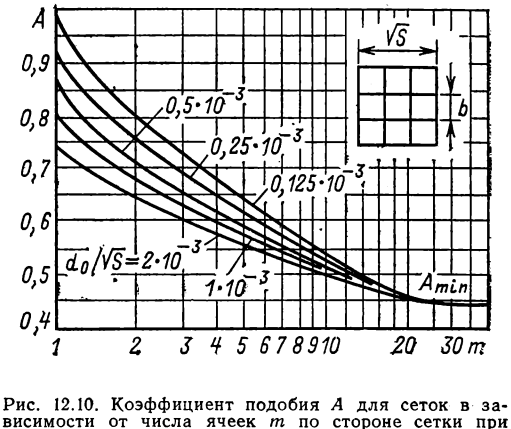


Рис. 12.10. Коэффициент подобия A для сеток в зависимости от числа ячеек m по стороне сетки при различных отношениях (d_0 — диаметр круглой стали или ширина полосы сетки)

Таблица 12.6. Сопротивление растекания естественных $R_{з,е}$ и искусственных $R_{з,и}$ одиночных заземлителей

Наименование заземлителя	Расчетные формулы	Обозначения величин
Неизолированный стальной трубопровод	$R_{з,е,тр} = \frac{0,16\rho_э}{l} \ln \frac{l^2}{hd}$	$\sigma_э$ — эквивалентное удельное сопротивление земли с учетом сезонного изменения, Ом·м; l — длина трубопровода; h — глубина заложения от поверхности земли, м; d — диаметр трубопровода, м
Обсадная труба скважины водоснабжения	$R_{з,е,скв} = \frac{0,16\rho_э}{l} \ln \frac{4l}{d}$	l — длина обсадной трубы, м; d — диаметр трубы, м
Стальные и железобетонные конструкции зданий и сооружений, погруженные в землю	$R_{з,е,зд} = 0,5\rho_э / \sqrt{S}$	S — площадь, ограниченная периметром конструкции или фундамента, м²
Оболочки кабелей, проложенных в земле	$R_{з,е,каб} = R_0 \sqrt{\rho_э/\rho_0}$	R_0 — сопротивление оболочек длиной более 200 м при ρ_0=100 Ом·м, определяемое по следующим значениям: кабели, шт. . . 1 2 3 R_0, Ом 2 1,5 1,2
Вертикальный электрод из круглой стали или трубы	$R_{з,и} = \frac{0,16\rho_э}{l} \times \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h+l}{4h-l}\right)$	l — длина стержня, м; d — внешний диаметр, м; h — глубина заложения от поверхности до середины вертикального электрода, м; b — ширина полосы, м; $h_п$ — глубина заложения полосы
Горизонтальный электрод из полосовой стали	$R_{з,и} = \frac{0,16\rho_э}{l} \ln \frac{2l^2}{h_п b}$	

лентное удельное сопротивление растекания при двухслойном грунте (ρ_1 и ρ_2) для расчета сопротивления сеток, принимаемое по рис. 12.12; S — площадь, занятая заземлителем при ее вычислении по внешнему периметру, м²;

б) для сетки из полос с вертикальными электродами

$$R_{з,и} = A\Delta\Delta_h \rho_{эR},$$

где A — коэффициент подобия, который может быть принят по рис. 12.10 при m=1 (число ячеек сетки); Δ — коэффициент, учитывающий снижение сопротивления заземлителя в зависимости от частоты сетки, относительной длины вертикальных электродов $l_в$ и относительного расстояния между ними $l_в/\sqrt{S}$ по рис. 12.13; Δ_h — коэффициент, учитывающий влияние глубины заложения на снижение сопротивления сетки с вертикальными электродами, определяемый приближенно по рис. 12.14; $\rho_{эR}$—эквивалентное удельное сопротивление для двухслойного грунта, определяемое по рис. 12.15.

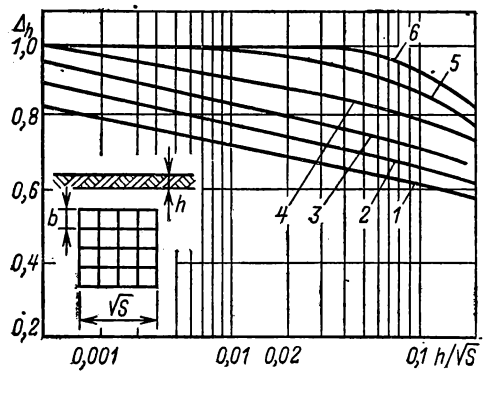


Рис. 12.11. Коэффициент Δ_h, учитывающий влияние глубины заложения на сопротивление сетки:
1 — m=1; *2* — m=2; *3* — m=4; *4* — m=8; *5* — m=16; *6* — пластина (предел частой сетки)

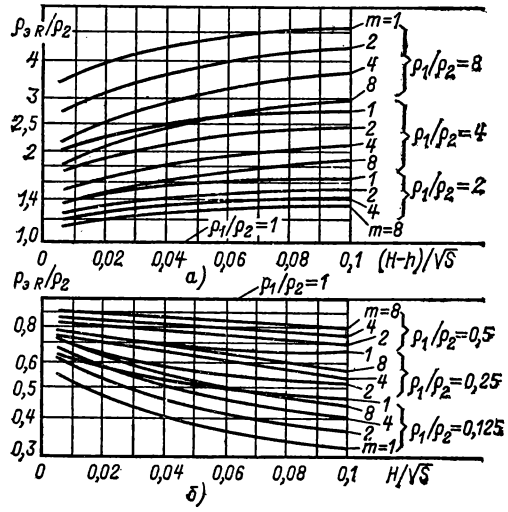


Рис. 12.12. Относительное удельное эквивалентное сопротивление грунта для расчета сопротивления сеток:
а — $\rho_1/\rho_2 \geqslant 1$; *б* — $\rho_1/\rho_2 \leqslant 1$

Значения сопротивлений $R_{з,и}$, полученные расчетом для простых и сложных заземлителей, не должны превышать нормированных.

В сетях напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью в качестве расчетного тока замыкания на землю следует принимать:

в сети без компенсации емкостных токов — полный ток замыкания на землю;

в сети с компенсацией емкостных токов: для ЗУ, к которым присоединены компенсирующие аппараты, — ток, равный 1,25 номинального тока этих аппаратов; для ЗУ, к которым не присоединены компенсирующие аппараты, — остаточный ток замыкания на землю, имеющий место в данной сети при отключении наиболее мощного из компенсирующих аппаратов или наиболее развитого участка сети.

В качестве расчетного тока может быть принят ток плавления предохранителей или ток срабатывания релейной защиты от однофазных замыканий, если в последнем случае защита обеспечивает отключение замыкания на землю. Ток замыкания на землю должен быть не менее 1,5 тока срабатывания релейной защиты или трехкратного номинального тока предохранителей. Расчетный ток замыкания на землю в этих сетях должен быть определен для той из возможных в эксплуатации схемы сети, при которой он принимает наибольшее значение. Значение емкостного тока замыкания на землю в кабельной сети определяется по табл. 12.7.

В электроустановках напряжением выше 1000 В сетей с эффективно заземленной нейтралью ЗУ, как правило, рассчитывают, исходя из требований к напряжению прикосновения с учетом времени действия основной и резервной защит на отключение установки в аварийном режиме. В этом случае допустимое сопротивление ЗУ определяется из расчета требуемого уровня напряжения на заземлителе при протекании через него тока замыкания на землю, т. е. $R_з = U_{з,д}/I_з$.

Во всех прочих электроустановках расчет ЗУ выполняется на основе допустимых значений сопротивления растекания.

Общие данные для выполнения расчета следующие:

сведения о максимально возможной (располагаемой) площади для искусственного заземлителя;

значения сопротивлений растекания существующих естественных заземлителей;

сведения о структуре и электрических параметрах грунта в зоне заземлителей;

данные о коррозионной активности грунта по отношению к стали;

данные, характеризующие климатическую зону;

значения расчетных токов однофазных коротких замыканий в сети с эффективно заземленной нейтралью.

Проверка расчетной величины $R_{з,и}$ по условию достижения нормированного значения напряжения на заземлителе $U_{з,д,пр}$.

При расчете искусственного заземлителя $R_{з,и}$ по допустимому напряжению прикоснове-

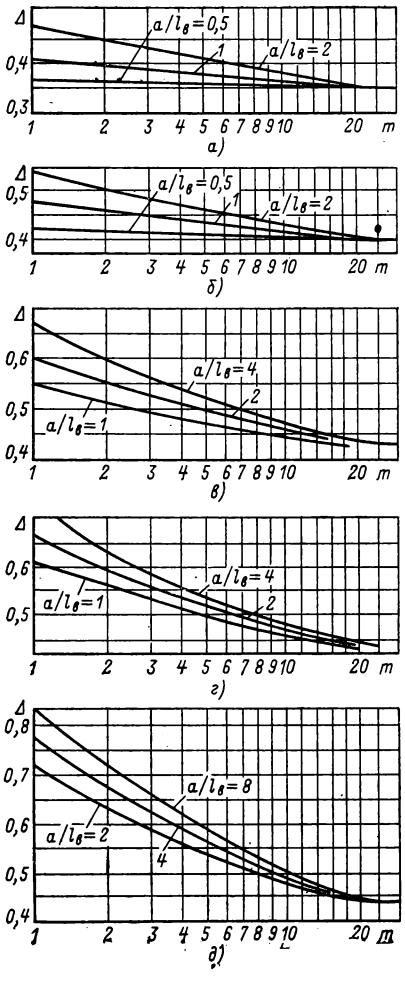


Рис. 12.13. Коэффициент Δ, учитывающий снижени сопротивления заземлителя в зависимости от относительной длины вертикальных электродов $l_в$, относительного расстояния между ними a и частоты сетки:

$а - l_в/\sqrt{S} = 0{,}5$; $б - l_в/\sqrt{S} = 0{,}25$; $в - l_в/\sqrt{S} = 0{,}125$; $г - l_в/\sqrt{S} = 0{,}0625$; $д - l_в/\sqrt{S} = 0{,}0312$

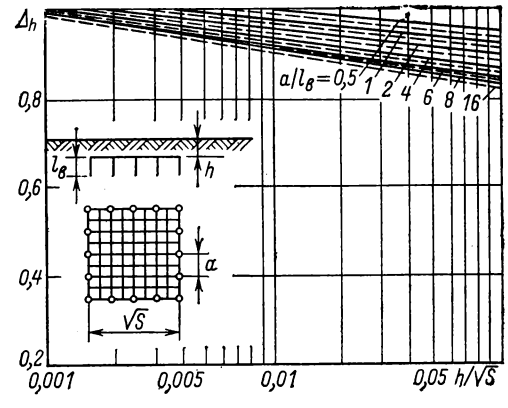


Рис. 12.14. Коэффициент Δ_h, учитывающий влияние глубины заложения на сопротивление сетки (при $m=8$) с вертикальными электродами:

— — $l_в/\sqrt{S} = 0{,}125$; — — — — $l_в/\sqrt{S} = 0{,}0625$

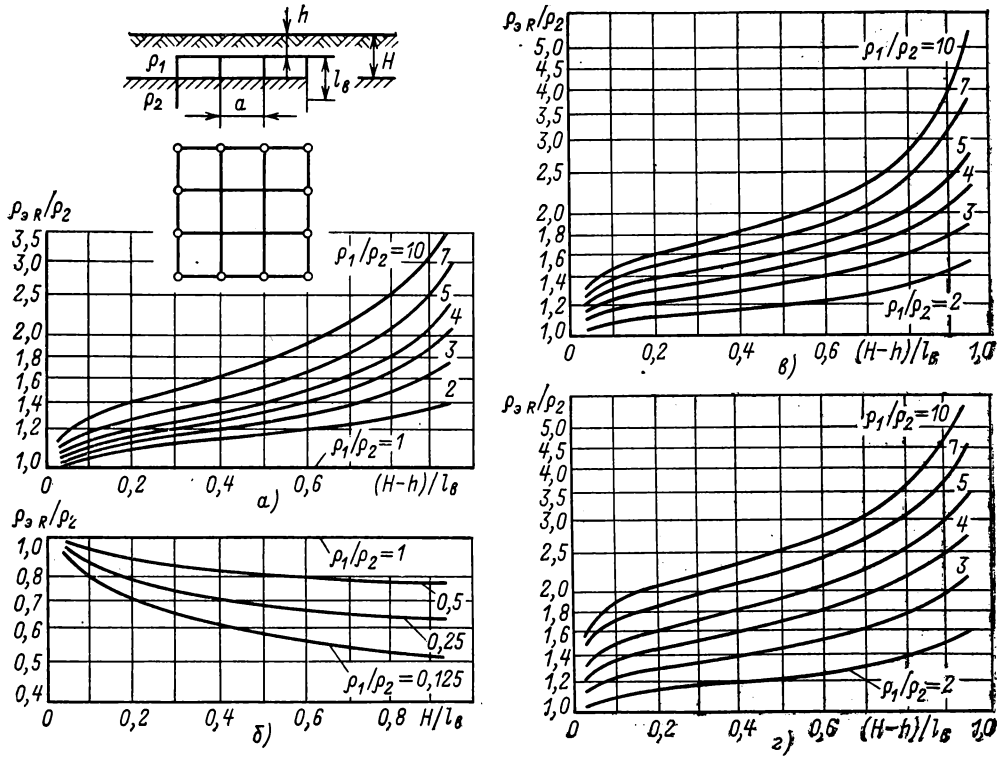


Рис. 12.15. Относительное эквивалентное удельное сопротивление грунта для расчета сопротивления сеток ($m=1\div8$) с вертикальными электродами:

а — $a/l_в=1$; $\rho_1/\rho_2 \geqslant 1$; *б* — $a/l_в=0{,}5\div4$, $\rho_1/\rho_2 \leqslant 1$; *в* — $a/l_в=2$, $\rho_1/\rho_2 \geqslant 1$; *г* — $a/l_а=4$, $\rho_1/\rho_2 \geqslant 1$

ния необходимо обеспечить выполнение условия:

$$R_{з,и} = R_e U_{з.д,пр}/(U_{з,е} - U_{з.д,пр}),$$

где $U_{з.д,пр}$ — напряжение на заземлителе, допустимое по условию прикосновения, В; $U_{з,е}$ — напряжение на естественном заземлителе при протекании через него всего расчетного тока ($U_{з,е}=I_з R_{з,е}$).

Таблица 12.7. **Емкостные токи замыкания на землю в кабельной сети**

Сечение кабеля, мм²	Ток замыкания на землю, А/км			
	Трехфазные кабели с секторными жилами		Одножильные кабели и трехфазные с отдельно освинцованными жилами	
	6 кВ	10 кВ	20 кВ	35 кВ
16	0,37	0,52	—	—
25	0,46	0,62	2,0	—
35	0,52	0,69	2,2	—
50	0,59	0,77	2,5	—
70	0,71	0,90	2,8	3,7
95	0,82	1,0	3,1	4,1
120	0,89	1,1	3,4	4,4
150	1,1	1,3	3,7	4,8
185	1,2	1,4	4,0	5,2
240	1,3	1,6	—	—
300	1,5	1,8	—	—

Примечание. Емкостный ток замыкания на землю для воздушной сети, А/км, в зависимости от напряжения может быть принят: 0,01 (при 6 кВ); 0,03 (при 10 кВ); 0,1 (при 35 кВ).

Допустимое напряжение прикосновения с учетом переходного сопротивления от земли к стопам ног определяется

$$U_{д,пр} = U_{н,т}/\beta,$$

где $\beta=1000/(1000+1{,}5\rho')$; ρ' — удельное сопротивление верхнего слоя (поверхности) земли, Ом·м.

Действительная величина напряжения прикосновения определяется с учетом коэффициента напряжения прикосновения $\alpha_{пр}$, который меньше единицы и зависит от конструкции заземлителя (определение $\alpha_{пр}$ — см. ниже).

При этом допустимое напряжение на заземлителе по условию напряжения прикосновения составляет:

$$U_{з,д,пр} = U_{д,пр}/\alpha_{пр} = U_{н,т}/\alpha_{пр}\beta,$$

где $U_{н,т}$ — нормированное напряжение на теле человека, В. $U_{з,д,пр}$ должно быть больше расчетного напряжения на заземлителе ($U_з=I_з R_з$) при расчетном токе замыкания на землю.

Расчетное напряжение прикосновения (на теле человека) находится по формуле

$$U_{р,т} = (U_з U_{н,т})/U_{з,д,пр}.$$

Оно должно быть меньше нормированного $U_{н,т}$.

Определение коэффициентов прикосновения внутри контура

Для заземлителя, выполненного в виде сетки без вертикальных электродов, коэффициент прикосновения определяется по формуле

$$\alpha_{пр} = \alpha_{пр,г}\,\alpha_h\,\rho_{эU}/\rho_{эR},$$

где $\alpha_{пр,г}$ — понижающий коэффициент напряжения прикосновения в центре угловой ячейки при размещении сетки на поверхности грунта ($h=0$), определяемый по рис. 12.16; α_h — понижающий коэффициент напряжения прикосновения, учитывающий влияние относительной глубины заложения сетки, определяемый по следующим данным:

$h/\sqrt{S}$	0,001	0,005	0,01	0,02	0,04	0,08
α_h	0,91	0,84	0,79	0,76	0,72	0,68

$\rho_{эU}$ — эквивалентное удельное сопротивление для расчета коэффициента напряжения прикосновения в сетках, определяемое по рис. 12.17.

Для заземлителя из сетки с вертикальными электродами

$$\alpha_{пр} = \alpha_{пр,г}\,\alpha_h\,\alpha_в\,(\rho_{эU}/\rho_{эR}),$$

где $\alpha_в$ — коэффициент, учитывающий снижение напряжения прикосновения от влияния вертикальных электродов и определяемый по рис. 12.18; $\rho_{эU}$ и $\rho_{эR}$ — эквивалентные удельные сопротивления, определяемые для двухслойного грунта по рис. 12.19 и 12.15, Ом·м; для однородного (однослойного) грунта $\rho_{эU}=\rho_{эR}=\rho$.

Коэффициент напряжения прикосновения может быть снижен увеличением числа ячеек сетки или относительной длины и плотности размещения вертикальных электродов. При малых площадях заземлителя следует снижать коэффициент напряжения прикосновения, как правило, применением относительно длинных вертикальных электродов, при больших площадях — устройством более частой сетки.

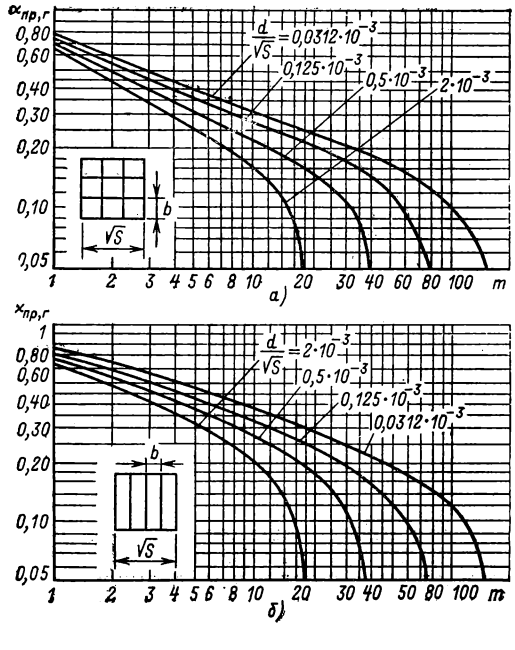


Рис. 12.16. Коэффициент напряжения прикосновения: *а* — в центре угловой ячейки сетки из пересекающихся проводников; *б* — в середине крайней секции сетки из параллельных проводников

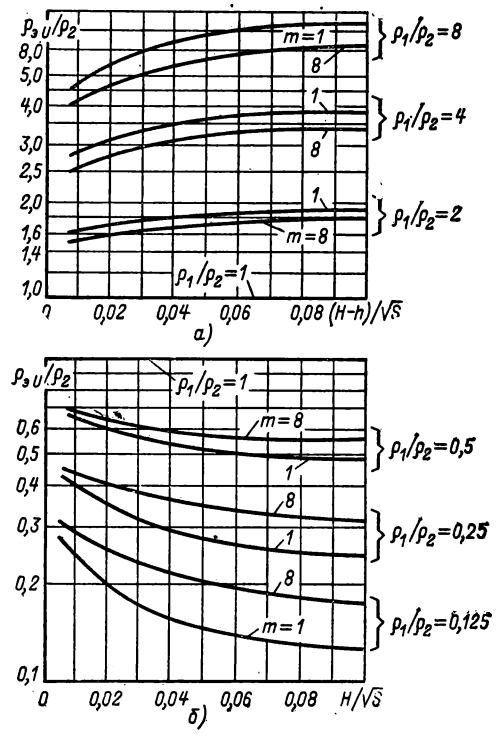


Рис. 12.17. Относительное эквивалентное удельное сопротивление грунта для расчета коэффициента напряжения прикосновения в сетках:
а — $\rho_1/\rho_2 \geqslant 1$; *б* — $\rho_1/\rho_2 \leqslant 1$

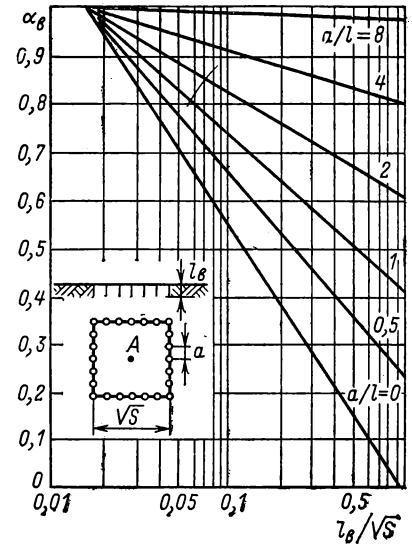


Рис. 12.18. Коэффициент $\alpha_в$, учитывающий уменьшение коэффициента напряжения прикосновения от добавления к сетке вертикальных электродов

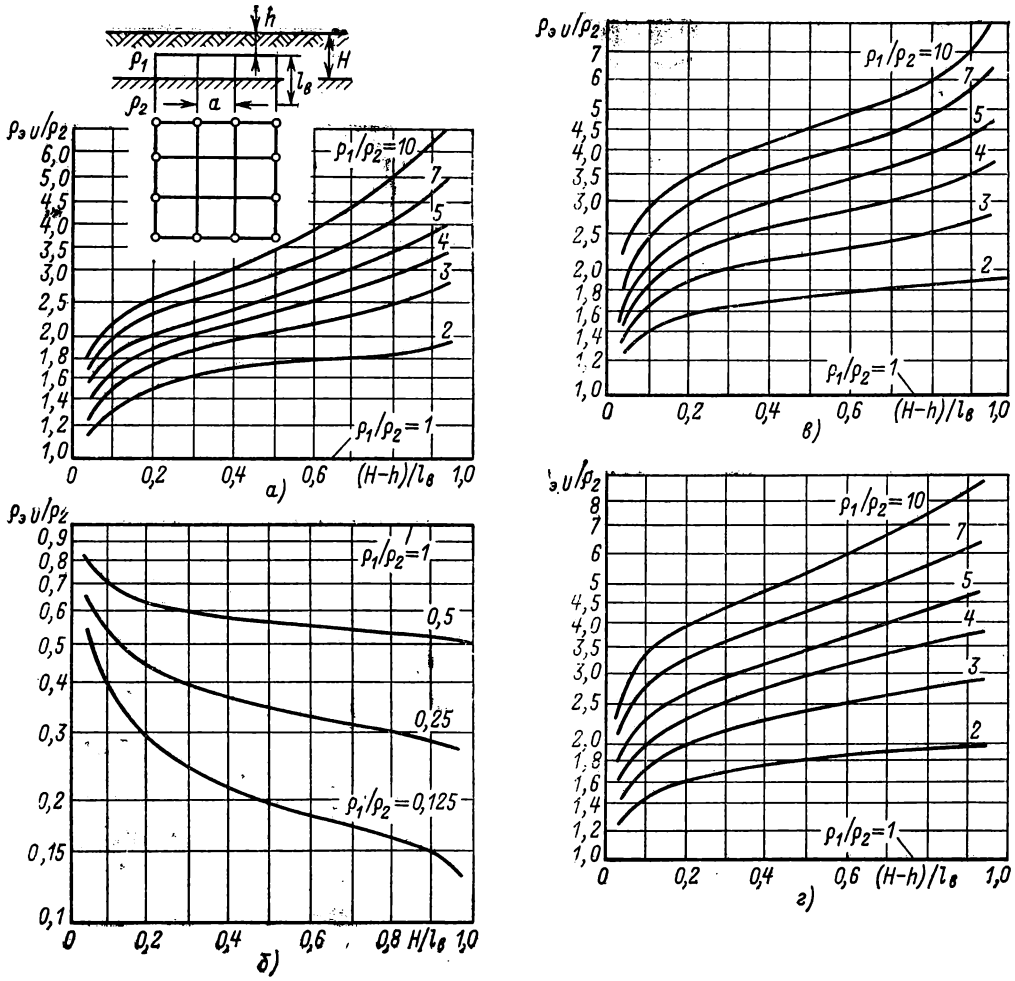


Рис. 12.19. Относительное эквивалентное удельное сопротивление грунта для расчета коэффициента напряжения прикосновения в сетках ($m=1\div8$) с вертикальными электродами:
а — $a/l_в=1$, $\rho_1/\rho_2\geqslant1$; *б* — $a/l_в=0{,}5\div4$, $\rho_1/\rho_2\leqslant1$; *в* — $a/l_в=2$, $\rho_1/\rho_2\geqslant1$; *г* — $a/l_в=4$, $\rho_1/\rho_2\geqslant1$

Шаг (ширина) ячейки, при котором напряжение прикосновения в центре угловой ячейки равно (или несколько меньше) допустимому напряжению прикосновения для основной территории ОРУ, принимается в качестве базового. По основной территории рекомендуется принимать переменный шаг ячеек с возрастанием от периферии к центру по следующей зависимости: $B_i=0{,}82\ B\exp(0{,}2i)\leqslant30$ м, где B — базовый шаг (ширина первой от периферии ячейки), м; i — номер ячейки, считая от периферии к центру (1, 2, 3, 4 ...).

Результаты расчетов при базовом шаге $B=4$ м соответствуют размещению горизонтальных полос с расстоянием между ними: 4, 5, 6, 7, 5, 9, 11, 13,5 и 20 м, считая от периферии к центру сетки.

Проверка выбранных заземляющих и нулевых защитных проводников

На термическую стойкость проверяются горизонтальные элементы заземления и заземляющие проводники установок напряжением выше 1000 В сетей с эффективно заземленной нейтралью, по которым возможно протекание токов однофазного короткого замыкания.

В качестве расчетной принимается допустимая температура нагрева стальных проводников 400 °С.

Минимальное сечение, мм², искусственных заземлителей и заземляющих проводников проверяется по формуле

$$F=I_з\sqrt{t_р}/68,$$

где $I_з$ — максимальный ток, протекающий через проводник (заземлитель) при расчетном однофазном токе короткого замыкания, А; $t_р$ — расчетное время, с, определяемое по сумме времени действия основной защиты и полного времени отключения выключателя, с.

Естественные заземлители, такие как металлические трубопроводы, обсадные трубы скважин, стальные и железобетонные конструкции зданий и сооружений и оболочки кабелей, а также ЗУ в целом, выбранное по условию

нормированного сопротивления или напряжения прикосновения, проверке на термическую стойкость не подлежат. Такая проверка необходима только для заземлителей, предназначенных к использованию в качестве элементов рабочей цепи в длительном или повторно-кратковременном режиме (например, использование земли в качестве провода при плавке гололеда).

Для установок с напряжением до и выше 1000 В в сетях с изолированными нейтралями проводимость заземляющих проводников должна быть не менее $^1/_3$ проводимости фазных проводов. Не требуется применение проводников сечением более 25 мм² для меди, 35 мм² для алюминия и 120 мм² для стали.

В производственных помещениях с электроустановками напряжением до 1000 В сечение магистрали заземления из стальной полосы должно быть не менее 100 мм², для установок напряжением выше 1000 В — не менее 120 мм². Допускается применение круглой стали той же проводимости.

Для электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью проводимость нулевых защитных проводников должна быть не менее $^1/_2$ проводимости фазных проводов, а общее сопротивление цепи фаза—нуль должно обеспечивать отключение линии при однофазных замыканиях.

В установках сетей напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью должна быть выполнена проверка фазных и нулевых защитных проводников на отключение линии при однофазных коротких замыканиях, при этом ток короткого замыкания (на корпус или на нулевой провод) должен превышать не менее чем:

в 3 раза номинальный ток плавкой вставки ближайшего предохранителя или номинальный ток нерегулируемого расцепителя или уставку регулируемого расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратно, зависящую от тока характеристику;

в 1,4 раза уставку электромагнитного расцепителя (отсечки) автомата с номинальным током до 100 А и в 1,25 раза автомата с номинальным током более 100 А.

Расчет тока однофазного короткого замыкания следует выполнять в соответствии с «Руководящими указаниями по расчету коротких замыканий, выбору и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания», утвержденными решением № 8-8/3 от 25 декабря 1975 г. Главного технического управления по эксплуатации энергосистем Минэнерго СССР (см. разд. 35).

Вычисление токов однофазного короткого замыкания в сетях напряжением до 1000 В рекомендуется выполнять по формуле

$$I^{(1)} = \sqrt{3}\,U/\sqrt{(r_{1\Sigma}+r_{2\Sigma}+r_{0\Sigma})^2+(x_{1\Sigma}+x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma})^2} = \sqrt{3}U/\sqrt{(2r_{1\Sigma}+r_{0\Sigma})^2+(2x_{1\Sigma}+x_{0\Sigma})^2},$$

где U — линейное (базисное) напряжение сети, для которой производится расчет (230, 400, 525, 690 В); $r_{1\Sigma}$, $r_{2\Sigma}$, $r_{0\Sigma}$ — суммарные активные сопротивления всей питающей цепи до точки короткого замыкания соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей, приведенные к базисному напряжению, Ом; $x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{0\Sigma}$ — суммарные реактивные сопротивления цепи до точки короткого замыкания соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей, приведенные к базисному напряжению, Ом.

Для снижения внешнего реактивного сопротивления нулевые защитные проводники (в том числе и стальные) рекомендуется прокладывать в непосредственной близости от фазных.

В цепях заземляющих и нулевых проводников не должно быть разъединяющих аппаратов и предохранителей. В цепи нулевых рабочих проводников допускается установка выключателей при условии одновременного отключения всех проводов, находящихся под напряжением. Однополюсные выключатели следует устанавливать в фазных проводах, но не в нулевых.

Заземление и зануление переносных электроприемников

Питание переносных электроприемников следует выполнять от сети напряжением не выше 380 В.

В зависимости от категории опасности помещения переносные электроприемники могут питаться либо непосредственно от сети, либо через разделяющие или понижающие трансформаторы.

Металлические корпуса переносных электроприемников с переменным напряжением выше 42 В и постоянным 110 В в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках должны быть заземлены или занулены, за исключением электроприемников с двойной изоляцией или питающихся от разделительных трансформаторов.

Заземление или зануление переносных электроприемников должно выполняться специальной жилой, расположенной в одной оболочке с фазными жилами переносного провода и присоединяемой к корпусу электроприемника и к специальному контакту вилки соединителя. Сечение этой жилы должно быть равным сечению фазных проводников.

Передвижные электростанции и трансформаторные подстанции должны иметь заземляющие (зануляющие) устройства, выполненные как для стационарных установок.

Электроприемники передвижных установок, получающие питание от этих электростанций или подстанций, должны иметь заземляющие или зануляющие устройства, аналогичные устройствам электроприемников, получающих питание от стационарных установок.

Заземление передвижных электростанций и передвижных механизмов не требуется в следующих случаях:

1. Если передвижные механизмы имеют собственную электростанцию, расположенную непосредственно на механизме на общей металлической раме и не питающую другие установки.

2. Если механизмы (при числе их не более двух) питаются от специально предназначенной для них передвижной электростанции, не питающей другие установки, и находятся на расстоянии не более 50 м от электростанции,

а корпуса электростанции и механизмов имеют металлическую связь при помощи соединительных проводников.

12.10. СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Электрозащитные средства — переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих в электроустановках, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги и электромагнитного поля.

В табл. 12.8 приведена классификация электрозащитных средств по их назначению и применению в электроустановках напряжением до и выше 1000 В.

12.11. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ЗОН

Выбор электрооборудования для помещений и наружных установок, являющихся пожароопасными, производится в соответствии *классом пожароопасных зон*. Согласно ПУЭ (гл. 4 «Электроустановки в пожароопасных зонах») пожароопасной зоной называется пространство внутри и вне помещений, в пределах которого постоянно или периодически обращаются горючие (сгораемые) вещества и в которой они могут находиться при нормальном технологическом процессе или при его нарушениях.

Зоны класса П-I — зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются горючие жидкости с температурой вспышки выше 61 °С.

Зоны класса П-II — зоны, расположенные в помещениях, в которых выделяются горючие пыль или волокна с нижним концентрационным пределом воспламенения более 65 г/м³ к объему воздуха.

Зоны класса П-IIа — зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества.

Зоны класса П-III — зоны, расположенные вне помещений, в которых обращаются горючие жидкости с температурой вспышки выше 61 °С или твердые горючие вещества.

Зоны в помещениях и зоны наружных установок в пределах до 5 м по горизонтали и вертикали от аппарата, в котором постоянно или периодически обращаются горючие вещества, но технологический процесс ведется с применением открытого огня, раскаленных частей, либо технологические аппараты имеют поверхности, нагретые до температуры самовоспламенения горючих паров, пылей или волокон, не относятся в части их электрооборудования к пожароопасным.

Зоны в помещениях и зоны наружных установок, в которых твердые, жидкие и газообразные горючие вещества сжигаются в качестве топлива или утилизируются путем сжигания, не относятся в части их электрооборудования к пожароопасным.

Таблица 12.8. **Электрозащитные средства**

Наименование электрозащитного средства	Область применения	Основное или дополнительное
Изолирующие штанги	Операции с разъединителями (оперативные), для наложения заземления, измерительные — в электроустановках выше 1000 В	Основное
Изолирующие клещи	Смена предохранителей в установках до и выше 1000 В	»
Электроизмерительные клещи	Измерение тока или активной мощности без разрыва электрической цепи в сетях до и выше 1000 В	
Указатели напряжения	Контроль наличия или отсутствия напряжения в сети, фазировка кабелей и трансформаторов для параллельной работы в установках до и выше 1000 В	»
Устройства и приспособления для ремонтных работ	Штанги, лестницы, тяги, канаты, изготовленные из электроизоляционных материалов. Для изоляции человека при работах на ВЛ 110 кВ и выше	»
Слесарно-монтажный инструмент с изолированными рукоятками	Для ремонтных работ в электроустановках до 1000 В	»
Диэлектрические перчатки	Для работы в электроустановках выше 1000 В	Дополнительное
	В электроустановках до 1000 В	Основное
Диэлектрические боты	В электроустановках выше 1000 В	Дополнительное
Диэлектрические галоши	В электроустановках до 1000 В	»
Диэлектрические ковры	В электроустановках до и выше 1000 В	»
Изолирующие накладки и подставки	В электроустановках выше 1000 В	»
Индивидуальный экранирующий костюм (комплект)	Для защиты от воздействия электромагнитных полей промышленной частоты при напряжениях 400 кВ и выше	»
Переносное заземление	Для наложения на отключенные токоведущие части при ремонтных работах в установках до и выше 1000 В	»
Оградительные устройства, диэлектрические колпаки	Для ограждения работающих от случайного приближения на опасные расстояния к токоведущим частям, находящимся под напряжением, для преграждения входа на отдельные участки РУ, например щиты и др. — в установках до и выше 1000 В	»
Плакаты и знаки безопасности	Для запрещения действий с коммутационными аппаратами, предупреждения об опасности приближения к токоведущим частям, разрешения определенных действий персоналу	Дополнительное

Зоны в помещениях вытяжных вентиляторов, а также в помещениях приточных вентиляторов (если приточные системы работают с рециркуляцией воздуха), обслуживающих помещения с пожароопасными зонами класса П-II, относятся тоже к пожароопасным зонам класса П-II.

Зоны в помещениях вентиляторов местных отсосов относятся к пожароопасным зонам того же класса, что и обслуживаемая ими зона.

Для вентиляторов, установленных за наружными ограждающими конструкциями, обслуживающих пожароопасные зоны класса П-II и пожароопасные зоны любого класса местных отсосов, электродвигатели выбираются, как для пожароопасной зоны класса П-III.

При выборе электрооборудования, устанавливаемого в пожароопасных зонах, необходимо учитывать также условия окружающей среды (химическую активность, атмосферные осадки и т. п.).

В пожароопасных зонах любого класса должны быть предусмотрены меры для снятия статических зарядов с оборудования.

Неподвижные контактные соединения в пожароопасных зонах должны выполняться сваркой, опрессовкой, пайкой или свинчиванием.

Молниезащита зданий и сооружений, содержащих пожароопасные зоны, должны выполняться в соответствии с требованиями Инструкции по проектированию и устройству молниезащиты зданий и сооружений СН 305-77.

Выбор электрооборудования для пожароопасных зон

Электрические машины. В пожароопасных зонах любого класса могут применяться электрические машины с классами напряжения до 10 кВ при условии, что их оболочки имеют степень защиты по ГОСТ 14254-80 «Изделия электротехнические. Степени защиты. Обозначения. Методы испытаний» (см. § 9.3) согласно табл. 12.9.

Воздух для вентиляции электрических машин не должен содержать паров и пыли горючих веществ. Выброс отработавшего воздуха при разомкнутом цикле вентиляции в пожароопасную зону не допускается.

Электрооборудование переносного электрифицированного инструмента в пожароопасных зонах любого класса должно быть со степенью защиты оболочки IP33 (защита от твердых тел — инструментов и др. толщиной более 2,5 мм, защита от дождя) при условии выполнения специальных технологических требований к ремонту оборудования в пожароопасных зонах.

Электрические машины с частями, нормально искрящими по условиям работы (например, с контактными кольцами), должны располагаться на расстоянии не менее 1 м от мест размещения горючих веществ или быть отделены от них несгораемым экраном.

Для механизмов, установленных в пожароопасных зонах, допускается применение электродвигателей с меньшей степенью защиты оболочки, чем указано в табл. 12.9 при следующих условиях:

1) электродвигатели должны устанавливаться вне пожароопасных зон;

Таблица 12.9. **Минимальные допустимые степени защиты оболочек электрических машин в зависимости от класса пожароопасной зоны**

Вид установки и условия работы	Степень защиты оболочки для пожароопасной зоны класса			
	П-I	П-II	П-IIа	П-III
Стационарно установленные машины, искрящие или с искрящими частями по условиям работы	IP44	IP54	IP44	IP44
Стационарно установленные машины, не искрящие и без искрящих частей по условиям работы	IP44	IP44	IP44	IP44
Машины с частями, искрящими и неискрящими по условиям работы, установленные на передвижных механизмах и установках (краны, тельферы, электротележки и т. п.)	IP44	IP54	IP44	IP44

2) привод механизма должен осуществляться при помощи вала, пропущенного через стену, с устройством в ней сальникового уплотнения.

Электрические аппараты и приборы. В пожароопасных зонах могут применяться аппараты, приборы, шкафы и сборки зажимов, имеющие степень защиты оболочки не менее указанной в табл. 12.10.

В пожароопасных зонах любого класса могут применяться аппараты, приборы, шкафы и сборки зажимов, продуваемые чистым воздухом под избыточным давлением, а также в маслонаполненном исполнении (за исключением кислородных установок и подъемных механизмов).

Щитки и выключатели осветительных сетей рекомендуется выносить из пожароопасных зон любого класса.

Если в пожароопасных зонах любого класса по условиям производства необходимы электронагревательные приборы, то нагреваемые части их должны быть защищены от соприкосновения с горючими веществами, а сами приборы установлены на поверхности из негорючего материала. В пожароопасных зонах любого класса складских помещений, а также в зданиях архивов и библиотек применение нагревательных приборов запрещается.

Электрические грузоподъемные механизмы. Токоподвод подъемных механизмов (кранов, талей и т. п.) в пожароопасных зонах классов П-I и П-II должен выполняться гибким переносным кабелем с медными жилами, с резиновой изоляцией, в оболочке, стойкой к окружающей среде. В пожароопасных зонах классов П-IIа и П-III допускается применение троллеев и троллейных шинопроводов, но они не должны быть расположены над местами размещения горючих веществ.

Распределительные устройства и подстанции. Установка РУ напряжением до и выше 1000 В в пожароопасных зонах любого класса не рекомендуется. При необходимости такой установки степень защиты его элементов (шкафов и т. п.) должна соответствовать табл. 12.10.

Таблица 12.10

Вид установки и условия работы	Степень защиты оболочки для пожароопасной зоны класса			
	П-I	П-II	П-IIа	П-III
Установленные стационарно или на передвижных механизмах и установках (краны, тельферы, электротележки и т. п.), искрящие по условиям работы	IP44	IP54	IP44	IP44
Установленные стационарно или на передвижных механизмах и установках, не искрящие по условиям работы	IP44	IP44	IP44	IP44
Шкафы для размещения аппаратов и приборов	IP41	IP54* IP44**	IP44	IP44
Коробки сборок зажимов силовых и вторичных цепей	IP44	IP44	IP44	IP44

* При установке в них аппаратов и приборов, искрящих по условиям работы. До освоения промышленностью шкафов со степенью защиты оболочки IP54 могут применяться шкафы со степенью защиты оболочки IP44.

** При установке в них аппаратов и приборов, не искрящих по условиям работы.

В пожароопасных зонах любого класса, за исключением пожароопасных зон помещений, а также зданий и помещений архивов, музеев, библиотек и т. п., на участках, огражденных сетками, допускается открытая установка комплектных трансформаторных и преобразовательных подстанций (КТП, КПП) с трансформаторами сухими или с негорючим заполнением, а также комплектных конденсаторных установок (ККУ) с негорючим заполнением конденсаторов. При этом степень защиты оболочки шкафов КТП, КПП и ККУ до ограждения должна быть не менее IP41 (цифра 1 означает, что должна быть защита от капель воды, падающих вертикально на оболочку).

В пожароопасных зонах любого класса, за исключением пожароопасных зон в складских помещениях, а также помещений архивов и т. п., могут размещаться встроенные или пристроенные КТП и КПП с маслонаполненными трансформаторами и подстанции с маслонаполненными трансформаторами в закрытых камерах, сооружаемые в соответствии с требованиями ПУЭ. Подстанции с маслонаполненными трансформаторами могут быть встроенными или пристроенными при выполнении следующих условий:

1) двери и вентиляционные отверстия камер трансформаторов и батарей конденсаторов с масляным заполнением не должны выходить в пожароопасные зоны;

2) отверстия в стенах и полу в местах прохода кабелей и труб электропроводок должны быть плотно заделаны несгораемыми материалами;

3) выход из подстанции с маслонаполненными трансформаторами, установленными в камерах, в пожароопасную зону может быть выполнен только из помещения РУ напряжением до 1000 В;

4) выход из помещений КТП и КПП в пожароопасную зону, а также транспортировка трансформаторов КТП и КПП через пожароопасную зону не допускается.

Электрооборудование с масляным заполнением (трансформаторы, батареи конденсаторов, выключатели и др.) может устанавливаться на расстоянии не менее 0,8 м от наружной стены здания с пожароопасными зонами при условии, что расстояние по горизонтали и вертикали от проемов в стене здания до установленного электрооборудования будет не менее 4 м.

Электрические светильники. В пожароопасных зонах должны применяться светильники, имеющие степень защиты по ГОСТ 17677-82. «Светильники. Общие технические условия». Степень защиты светильника от проникновения воды выбирается в зависимости от условий среды, в которой он устанавливается. Как правило, светильники в пожароопасных зонах должны быть пылезащищенными.

Конструкция светильников с лампами ДРЛ должна исключать выпадение из них ламп. Светильники с лампами накаливания должны иметь сплошное силикатное защитное стекло, не иметь отражателей и рассеивателей из сгораемых материалов. В пожароопасных зонах любого класса складских помещений светильники с люминесцентными лампами не должны иметь отражателей и рассеивателей из горючих материалов.

Электропроводка внутри светильников с лампами накаливания и ДРЛ до места присоединения внешних проводников должна быть термостойкой.

Переносные светильники в пожароопасных зонах любого класса должны иметь степень защиты не менее IP54; стеклянный колпак светильника должен быть защищен металлической сеткой.

Электропроводки, токопроводы, воздушные и кабельные линии

В пожароопасных зонах любого класса разрешаются все виды прокладок кабелей и проводов. При этом кабели и провода должны иметь покров и оболочку из материалов, не распространяющих горение. Применение кабелей с горючей полиэтиленовой изоляцией не допускается.

Через пожароопасные зоны любого класса, а также на расстояниях менее 1 м по горизонтали и вертикали от пожароопасной зоны запрещается прокладывать не относящиеся к данному технологическому процессу (производству) транзитные электропроводки и кабельные линии всех напряжений. Расстояние от кабелей и изолированных проводов, прокладываемых открыто непосредственно по конструкциям, на изоляторах, лотках, тросах и т. п., до мест открыто хранимых (размещаемых) горючих веществ должно быть не менее 1 м.

Прокладка незащищенных изолированных проводов с алюминиевыми жилами в пожароопасных зонах любого класса должна производиться в трубах и коробах. Применение неизолированных проводов запрещается.

По эстакадам с трубопроводами с горючими газами и жидкостями, проходящими по территории с пожароопасной зоной класса П-I, допускается прокладка: изолированных прово-

дов в стальных трубах, небронированных кабелей в стальных трубах и коробах, бронированных кабелей открыто. При этом стальные трубы электропроводки, стальные трубы с небронированными кабелями и бронированные кабели следует прокладывать на расстоянии не менее 0,5 м от трубопроводов, по возможности со стороны трубопроводов с негорючими веществами.

Для передвижных электроприемников должны применяться переносные гибкие кабели с медными жилами, с резиновой изоляцией в оболочке, стойкой к окружающей среде.

Соединительные и ответвительные коробки в зонах любого класса должны иметь оболочку со степенью защиты не менее IP4X (не допускающую проникновение твердых тел размером до 1 мм и защищенную от проникновения воды в зависимости от условий окружающей среды). Части коробок, выполненных из металла, должны иметь внутри изолирующую вкладку или надежную окраску.

В пожароопасных зонах классов П-I, П-II и П-IIа допускается применение шинопроводов как с медными, так и с алюминиевыми шинами со степенью защиты оболочки не менее IP20, при этом в зонах классов П-I и П-II шины, в том числе ответвления к коммутационным аппаратам, должны быть изолированными.

Неразборные контактные соединения должны быть выполнены сваркой, а болтовые соединения — с применением приспособлений, предотвращающих самоотвинчивание.

Ответвительные коробки с коммутационными или защитными аппаратами, установленные на шинопроводах, должны иметь для пожароопасных зон классов П-I и П-IIа степень защиты не менее IP44, класса П-II — не менее IP54.

В пожароопасных зонах классов П-I и П-II запрещается, а в зоне класса П-IIа (за исключением пожароопасной зоны в складских помещениях, помещениях архивов и т. п.) допускается применение ответвительных коробок с разъемными соединителями.

Список литературы

12.1. **Правила** устройства электроустановок. 6-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1984. 640.

12.2. **Охрана** труда в электроустановках/Б. А. Князевский, Т. П. Марусова, Н. А. Чекалин, Н. В. Шипунов. М.: Энергоатомиздат, 1983. 336.

12.3. **Заземление** и зануление электроустановок промышленных предприятий. Технические решения. Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок. М.: Энергоатомиздат, 1982, № 4, с. 15—33.

12.4. **Правила** применения и испытания средств защиты, используемых в электроустановках. М.: Энергоатомиздат, 1983.

12.5. **Правила** защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтедобывающей промышленности. М.: Химия, 1973.

Раздел 13

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

13.1. Основные определения и классификация электроизоляционных материалов 380
13.2. Нагревостойкость электроизоляционных материалов 381
13.3. Жидкие и полужидкие диэлектрики 384
13.4. Полимерные органические диэлектрики 385
13.5. Электроизоляционные бумаги и картоны 388
13.6. Слоистые электроизоляционные пластмассы 390
13.7. Электроизоляционные составы (компаунды) 393
13.8. Электроизоляционные лакоткани . . 396
13.9. Электроизоляционные намотанные изделия 397
13.10. Электроизоляционные материалы на основе слюды 398
13.11. Электрокерамические материалы . . 400
Список литературы 400

13.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Электроизоляционными материалами называют диэлектрические материалы, с помощью которых осуществляется изоляция частей электрооборудования, находящихся под разными электрическими потенциалами. По сравнению с проводниковыми материалами (проводники) электроизоляционные материалы обладают значительно большим электрическим сопротивлением. Характерным свойством электроизоляционных материалов является возможность создания в них электростатического поля.

Согласно агрегатному состоянию электроизоляционные материалы делятся на газообразные, жидкие и твердые. Особенно большой является группа твердых электроизоляционных материалов (полимеры, пластмассы, керамика и др.).

Согласно химическому составу электроизоляционные материалы делятся на органические и неорганические. Основным элементом в молекулах всех органических электроизоляционных материалов является углерод. В неорганических диэлектриках углерода не содержится. Наибольшей нагревостойкостью обладают неорганические электроизоляционные материалы (слюда, керамика и др.).

По расположению частиц, составляющих электроизоляционные материалы, последние делятся на материалы кристаллической и аморфной структуры.

С точки зрения электрического состояния молекул электроизоляционные материалы делят на неполярные и полярные. *Неполярные* электроизоляционные материалы состоят из электрически нейтральных атомов и молекул, которые до воздействия на них внешнего электрического поля не обладают электрическими моментами. Нейтральные атомы и молекулы приобретают электрические моменты только

под действием внешнего электрического поля — в процессе деформационных поляризаций. Неполярными электроизоляционными материалами являются: полиэтилен, фторопласт-4, полистирол, парафин и др. Среди неполярных электроизоляционных материалов выделяют группу кристаллических материалов (слюда, кварц, отдельные виды керамики и др.), в которых каждая пара ионов составляет неполярную молекулу. Каждый ион находится в колебательном тепловом движении около своего центра равновесия — узла кристаллической решетки.

Полярные электроизоляционные материалы состоят из полярных молекул — постоянных диполей. Последние вследствие асимметрии своего строения обладают начальным электрическим моментом — до воздействия на них электрического поля. При воздействии электрического поля полярные молекулы ориентируются, стремясь расположить свои оси в направлении действующего на них электрического поля. К полярным электроизоляционным материалам относятся: совол, совтол, поливинилхлорид, бакелиты и др. Полярные электроизоляционные материалы обладают повышенными значениями относительной диэлектрической проницаемости, несколько повышенной проводимостью и гигроскопичностью по сравнению с неполярными электроизоляционными материалами.

Многочисленную группу твердых электроизоляционных материалов делят еще на ряд подгрупп в зависимости от их состава, структуры и технологических особенностей этих материалов; так, выделяют электрокерамические материалы, полимерные материалы, лаки, компаунды, изоляционные материалы на основе слюды и др. Основные электрические и физико-механические характеристики жидких и твердых электроизоляционных материалов приводятся в соответствующих таблицах данного раздела справочника.

13.2. НАГРЕВОСТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Электроизоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, трансформаторах и аппаратах, разделяются по их нагревостойкости на семь классов согласно табл. 13.1 и 13.2.

Согласно современным воззрениям наиболее типичными процессами теплового старения электроизоляционных материалов являются:

1) выделение низкомолекулярных летучих веществ, которые образуются в процессе старения;

2) окисление, вызывающее появление хрупкости материала;

3) развитие процесса полимеризации молекул, которая в начале может улучшать электрические характеристики, а затем вызывать снижение эластичности, появление хрупкости материала и разрушение его под воздействием механических усилий;

Таблица 13.1. **Нагревостойкость электроизоляционных материалов (ГОСТ 8865-70)**

Класс нагревостойкости[1]	Температура[2], °С	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости[3]
Y	90	Непропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов[4]
A	105	Пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов[4]
E	120	Синтетические органические материалы: пленки, волокнистые материалы, смолы, компаунды, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
B	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
H	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов[4]
C	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или элементоорганическими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов

[1] Нагревостойкость — способность электроизоляционного материала выполнять свои функции при воздействии рабочей температуры в течение времени, сравнимого с расчетным сроком нормальной эксплуатации электрооборудования, в котором применяется данный электроизоляционный материал.

[2] Указанные в таблице температуры являются предельно допустимыми для электроизоляционных материалов при их длительном использовании (в течение ряда лет) в электрических машинах, трансформаторах и аппаратах, работающих в нормальных эксплуатационных условиях. Температуры в наиболее нагретом месте изоляции не должны превышать указанных предельно допустимых температур при работе электрооборудования в номинальном режиме при предусмотренной для этого режима максимальной температуре охлаждающей среды, указанной в соответствующих ГОСТ или ТУ.

[3] С электроизоляционными материалами данного класса допускается совместное применение материалов предшествующих классов при условии, что под действием температуры, допускаемой для материалов более высокого класса, электрические и механические свойства комплексной изоляции не должны претерпевать изменений, могущих сделать изоляцию непригодной для длительной работы.

[4] Другие сочетания материалов, для которых установлена возможность их работы при температуре, соответствующей данному классу.

Таблица 13.2. **Ориентировочное распределение электроизоляционных материалов по классам нагревостойкости**[1]

Класс нагревостойкости	Электроизоляционные материалы[2]	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве указанных материалов	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве электрических машин, трансформаторов и аппаратов с использованием указанных материалов
Y	Текстильные материалы на основе хлопка, натурального шелка, регенерированной целлюлозы, ацетилцеллюлозы и полиамидов; целлюлозные электроизоляционные бумаги, картоны и фибра	Не применяются	Не применяются
	Пластические массы с органическими наполнителями	Мочевиноформальдегидные смолы	Не требуются
A	Материалы класса Y, если они пропитаны изоляционным составом или погружены в жидкие диэлектрики (масло и др.). Ацетобутилатцеллюлозные, ацетилцеллюлозные, деацетатные пленки	Не применяются	Лаки на основе натуральных смол (шеллак, копалы и др.), эфирцеллюлозные лаки, соответствующие данному классу нагревостойкости; термопластичные компаунды (битумные и др.) с температурой размягчения, обеспечивающей отсутствие вытекания при рабочих температурах только в неподвижных обмотках
	Пленкоэлектрокартон на основе ацетилцеллюлозной пленки	Клеящие составы, соответствующие данному классу нагревостойкости	
	Лакоткани, лакобумаги и лакочулки на основе хлопчатобумажной пряжи, натурального шелка, регенерированной целлюлозы, ацетатцеллюлозы или полиамидных волокон	Масляные, смоляные, масляно-смоляные лаки	Нефтяные и синтетические изоляционные жидкости, соответствующие данному классу нагревостойкости
	Изоляция эмалированных проводов	Масляно-смоляные лаки, соответствующие данному классу нагревостойкости	Не требуются
	Слоистые пластики на основе целлюлозных бумаг и тканей	Термореактивные смолы фенолформальдегидного типа	
	Полиамидные пленки	—	
	Полиамидные литьевые смолы	—	
	Асбестоцемент, пропитанный органическим составом, не вытекающим при 110 °С	Битум, каменноугольный пек и др.	
	Древеснослоистые пластики	Фенолформальдегидные смолы	
	Термореактивные компаунды на основе акриловых и метакриловых эфиров (без наполнителей)	—	
E	Пленки и волокна из полиэтилентерефталата	Клеящие и пропитывающие составы соответствующей нагревостойкости	Термопластичные компаунды с температурой размягчения, обеспечивающей отсутствие вытекания их при рабочих температурах только в неподвижных обмотках. Составы, применяемые для изоляции класса B (см. ниже)
	Материалы на основе электроизоляционного картона и полиэтилентерефталатной пленки. Стеклолакоткани и лакоткани на основе полиэтилентерефталатных волокон	—	
	Термореактивные синтетические смолы в компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые). Термореактивные компаунды на основе акриловых и метакриловых эфиров с неорганическим наполнителем	—	Не требуются
B	Материалы на основе щипаной слюды, слюдопластов и слюдинитов, в том числе с бумажной или тканевой органической подложкой	Битумно-масляные лаки; природные и синтетические смолы, не модифицированные и модифицированные растительными маслами, и лаки на их основе	Битумно-масляно-смоляные лаки (на тунговом масле), лаки на основе природных и синтетических смол, модифицированных растительными маслами, соответствующие данному классу нагревостойкости
	Стеклоткани и стеклолакочулки	Лаки: битумно-масляно-смоляные, эскапоновые, эпоксидные, полиуретановые, а также на основе алкидных смол, модифицированных маслом	То же
	Асбестовые волокнистые материалы, в том числе с органическими волокнами	Шеллак, бакелитоглифталевые и эпоксидные лаки, а также синтетический каучук	»
	Изоляция эмалированных проводов	Лаки на основе полиэтилентерефталатных смол и другие синтетические лаки	»

Продолжение табл. 13.2

Класс нагревостойкости	Электроизоляционные материалы[2]	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве указанных материалов	Связующие, пропитывающие и покровные составы, применяемые при производстве электрических машин, трансформаторов и аппаратов с использованием указанных материалов
B	Пластмассы с неорганическим наполнителем. Слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов. Термореактивные синтетические компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые) с минеральным наполнителем и отвердителем, соответствующими данному классу нагревостойкости	Термореактивные смолы фенолформальдегидного типа, меламиноформальдегидные, фенолфурольные, эпоксидные и полиэфирные	Не требуются
	Асбестоцемент, пропитанный органическим составом, не вытекающим при 135 °С	Битум каменноугольный пек и другие составы с последующей термообработкой	»
F	Материалы на основе щипаной слюды, слюдинитов и слюдопластов без подложки или с неорганической подложкой	Соответствующие данному классу нагревостойкости смолы и лаки: модифицированные и немодифицированные алкидные, эпоксидные, полиуретановые, кремнийорганические и др.	Соответствующие данному классу нагревостойкости смолы и лаки: модифицированные алкидные, эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые, кремнийорганические и др.
	Стекловолокнистые и асбестовая изоляция проводов. Стеклоткани и стеклочулки	То же	Не требуются
	Слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов		
	Стекловолокнистая и асбестовая изоляция проводов	Кремнийорганические, эпоксидные и другие лаки, соответствующие по нагревостойкости	Соответствующие данному классу нагревостойкости смолы и лаки: алкидные, эпоксидные, полиуретановые и кремнийорганические
H	Материалы на основе щипаной слюды без подложки или с неорганической подложкой. Стекловолокнистая изоляция проводов. Стеклоткани и стеклолакочулки	Соответствующие данному классу нагревостойкости кремнийорганические и другие лаки и смолы	Соответствующие данному классу нагревостойкости кремнийорганические лаки
	Слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов. Пластические массы с неорганическим наполнителем. Асбестоцемент. Кремнийорганические эластомеры без подложек и с неорганическими подложками	То же	Не требуются
	Асбестовые материалы (пряжа, ткани, бумаги)	Не применяются	Соответствующие данному классу нагревостойкости кремнийорганические лаки
C	Слюда. Стекло бесщелочное и стекловолокнистые материалы. Электротехническая керамика. Кварц. Асбестоцемент непропитанный. Шифер электротехнический	Не применяются	Не требуются
	Материалы на основе щипаной слюды без подложки или со стекловолокнистой подложкой	Неорганические составы и элементоорганические смолы с повышенной нагревостойкостью	
	Микалекс. Политетрафторэтилен. Полиимиды	Не применяется	Не требуется

[1] Классификация электроизоляционных материалов, приведенных в таблице, является ориентировочной и будет уточняться по мере накопления опытных данных и показателей эксплуатации.

[2] Перечисленные материалы являются основными, но они не исчерпывают многообразия электроизоляционных материалов, появляющихся в связи с новыми разработками. Нагревостойкость одного и того же материала может быть различной в зависимости от того, какие функции он выполняет в электрической машине или аппарате.

4) гидролитическая деструкция за счет взаимодействия остаточной влаги с электроизоляционным материалом под действием теплоты;

5) химическое разрушение компонентов с образованием химически активных веществ, например хлористого водорода.

Наиболее полную картину теплового старения электроизоляционных материалов дает кривая старения материала, представляющая собой зависимость определенных свойств материала от температуры его старения (кривая жизни). Согласно стандарту МЭК (публикация 216-1 и 216-2) для определения нагревостойкости того или иного материала вводится характеристика, называемая температурным индексом (ТИ).

Температурный индекс есть число, соответствующее температуре (°С), взятой из «кривой жизни», при которой срок службы материала равен 20 000 г. Этот промежуток времени был выбран, чтобы получить приближенное представление о температуре, которая обычно обеспечивает достаточный срок службы материала при работе его в большинстве типов электрооборудования.

В настоящее время ведутся работы по уточнению «кривых жизни» электроизоляционных материалов, по которым будут определены их температурные индексы (ТИ).

13.3. ЖИДКИЕ И ПОЛУЖИДКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Таблица 13.3. **Основные свойства жидких и полужидких электроизоляционных материалов**

Показатель	Нефтяное масло		Негорючие синтетические жидкости		ПЭСЖ-Д (кремнийорганическая жидкость)	Касторовое масло	Вазелин конденсаторный нефтяной
	трансформаторное[1]	для конденсаторов	Совол	Совтол-10			
Плотность при 20 °С, кг/м³	880—890	900—920	1540—1560	1530—1540	990—1000	950—970	820—840
Цвет	Соломенно-желтый	Соломенно-желтый	Бесцветный	Бесцветный	Бесцветный	Бледно-желтый	Соломенно-желтый
Зольность, %, не более	0,005	0,0015	—	—	—	0,008	0,004
Кислотное число, КОН на 1 кг масла[2], не более	0,01—0,05	0,01—0,015	0,015	0,01	0,05—0,07	0,03—0,05	0,03—0,04
Температура застывания, °С, не выше	—45	—45	+5	—7	—60	—(15—18)	Температура каплепадения 37—40 °С
Температура вспышки паров, °С, не ниже	+135	+135	+200	+200	+150	+240	—
Температурный коэффициент расширения, °С$^{-1}$	0,00063—0,00068	0,00067	0,00065	0,00060	0,0003	—	—
Вязкость при 20 °С, 10^{-6} м²/с	28—30	35—40	290[3]	650	70—80	—	—
Вязкость при 50 °С, 10^{-6} м²/с	9,0—9,6	6—9	9[3]	25	—	26—28	28—30[3]
Удельное объемное сопротивление при 20 °С, Ом·м	10^{12}—10^{13}	10^{12}—10^{13}	10^{12}—10^{13}	10^{11}—10^{12}	10^{10}—10^{12}	10^{10}—10^{11}	10^{12}—10^{13}
Относительная диэлектрическая проницаемость при 20 °С	2,1—2,4	2,1—2,3	5,0—5,2	4,5—4,8	2,6—2,8	4,5—4,8	3,8—4,0
Тангенс угла диэлектрических потерь при 20 °С и 50 Гц	0,001—0,003	При 100 °С 0,003—0,005	0,02[4]—0,03	0,005—0,008	0,0002—0,003	0,008—0,015	0,0002
Электрическая прочность при 20 °С и 50 Гц, МВ/м	15—20	20—25	20—22[4]	20—22[4]	18—20	12—16	20—22
Цена 1 кг	28—32 коп.	24—26 коп.	75—96 коп.	1 р. 11 к.	7 р. 60 к.	1 р. 99 к.	35 коп.

[1] Трансформаторное масло выпускается четырех марок; ТК; Т-750; Т-1500; ПТ (ГОСТ 982-80). Характеристики этих масел укладываются в пределы, приведенные в таблице.

[2] Все электроизоляционные жидкости (масла) не должны содержать водорастворимых кислот, щелочей и механических примесей.

[3] Вязкость при 90 °С.

[4] Электрическая прочность при 65 °С.

13.4. ПОЛИМЕРНЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Таблица 13.4. **Основные свойства синтетических полимерных диэлектриков (термопластичных пластмасс)**

Наименование диэлектрика	Плотность, кг/м³	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	Разрушающее напряжение при статическом изгибе, МПа	Разрушающее напряжение при ударном изгибе, кДж/м²	Теплостойкость по Мартенсу, °С	Холодостойкость, °С	Водопоглощение за 24 ч, %	Электрические параметры при 20 °С: ρ_v, Ом·м	ε_r при 50 Гц	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	Общая характеристика и цена за 1 кг
Полистирол[2]	1050—1070	35—70	85—100	80—90	6—15	75—85	—(60—70)	0,00—0,02	10^{13}—10^{15}	2,4—2,6	$(2—3)\times10^{-4}$	25—40[4]	Прозрачный термопластичный материал. Применяется для изготовления каркасов катушек, оснований, изоляционных пленок[4], нитей и лаков. 66—90 коп.
Полиэтилен[3]	920—960	12—40[4]	—	1,2—3,8	Не ломается	50—65	—(65—70)	0,00—0,005	10^{13}—10^{15}	2,2—2,4	$(2—6)\times10^{-4}$	35—60[4]	Непрозрачный термопластичный материал. Применяется для изготовления деталей (полиэтилен высокой плотности), а также гибкой изоляции проводов, кабелей (полиэтилен низкой плотности). 65 коп.—1 р. 10 коп.
Фторопласт-3	2100—2180	27—30[5]	80—150	60—80	16—20	70—75	—(180—190)	0,00—0,01	10^{14}—10^{15}	2,8—3,0	$(10—15)\times10^{-3}$	15—20[4]	Роговидный негорючий материал[7], при 20 °С не растворяется, устойчив в интервале температур от —180 до +100 °С. 9—11 руб.
Фторопласт-4[7]	2100—2200	35—40[6]	20—25	11—14	120—150	200—250	—(195—200)	0,00	10^{16}—10^{17}	1,9—2,2	$(1—3)\times10^{-4}$	35—50[6]	Твердый негорючий материал, используемый в виде плат, а также в конденсаторах, проводах в виде лент[6] и суспензии, наносимой на провод с последующим горячим обжатием. 5 р. 50 к.—8 р. 00 к.
Поликапролактам[8] (капрон)	1130—1150	50—60	50—60	60—85	105—160	50—55	—(10—20)	1,3—1,4	10^{10}—10^{11}	3,6—5,0	$(12—27)\times10^{-3}$	15—18	Твердый материал с повышенной дугостойкостью. Применяется для изготовления каркасов катушек изоляционных пленок и нитей
Полиуретан[8]	1170—1200	50—60	60—80	60—80	40—50	60—65	—(30—35)	0,0—0,2	10^{12}—10^{13}	4—5	$(8—12)\times10^{-3}$	20—25	То же, но материал с повышенной водостойкостью. Применение: пористые пластмассы и лаки. 2 р. 50 к. — 4 р. 35 к.
Лавсан[9]	1300—1400	12—20	—	—	—	Температура размягчения 230—250 °С	—(55—60)	0,1—0,5	10^{12}—10^{13}	3,0—3,5	$(2—6)\times10^{-2}$	80—120	Прозрачный материал: Применяется в виде изоляционных пленок в электромашинах (пазовая изоляция) низкого напряжения и конденсаторах, 1 р. 20 к. — 1 р. 32 к.[14]

Продолжение табл. 13.4

Наименование диэлектрика	Плотность, кг/м³	Разрушающее напряжение при				Теплостойкость по Мартенсу, °С	Холодостойкость, °С	Водопоглощение за 24 ч, %	Электрические параметры при 20 °С				Общая характеристика и цена за 1 кг
		растяжении, МПа	сжатии, МПа	статическом изгибе, МПа	ударном изгибе[1], кДж/м²				ρ_v, Ом·м	ε_r при 50 Гц	tgδ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	
Винипласт[10]	1350—1400	40—60	90—150	10—12	150—180	25—35	—(25—40)	0,8—1,0	10^{10}—10^{11}	3,2—4,0	$(1—5)\times10^{-2}$	15—30	Электроизоляционные детали с высокой механической прочностью (платы основания и др.), очень стойкие к удару. Дугогасящий материал. 1 р. 60 к.
Полиметилметакрилат[11]	1180—1200	45—55	70—85	60—65	10—12	50—80	—(60—70)	0,2—0,3	10^{11}—10^{12}	3,5—3,9	$(2—6)\times10^{-2}$	20—40	Электроизоляционные детали (основания, панели, трубки для разрядников), шкалы и др. Дугогасящий материал. 1 р. 20 к.—1 р. 40 к.
Поливинилхлорид (пластикаты)[12]	1260—1600	10—20	—	—	Не ломается	—	—(35—50)	0,1—0,3	10^{10}—10^{12}	6—8	$(5—8)\times10^{-2}$	6—15	Гибкие рулонные материалы. Применяемые для изоляции, а также для защитных оболочек проводов и кабелей изоляционные шланги и трубки. 1 р. 73 к.
Полиформальдегид[13]	1430	65—70	30	100—108	90—150	80—100	—(40—45)	0,3—0,4	10^{12}—10^{13}	3,7—4,0	$(1—4)\times10^{-3}$	20—22	Твердый рогообразный материал с высокими антифрикционными свойствами. 1 р. 70 к.

[1] Эту характеристику называют также ударной вязкостью.

[2] Полистирол выпускается блочный (пластины, листы, бруски) и эмульсионный — в виде порошка, из которого прессуют или отливают (под давлением) различные электроизоляционные детали. Из полистирола изготовляют полистирольные пленки и ленты толщиной 20—100 мкм. Основные характеристики блочного и эмульсионного полистирола укладываются в пределы, приведенные в таблице. У изделий температура размягчения полистирола 95—105 °С. У ударопрочных сортов полистирола предел прочности при ударном изгибе составляет 40—50 кДж/м².

[3] Полиэтилен выпускается в виде гранул, блоков, а также пленок, лент и нитей. Различают полиэтилены высокого (ВД), среднего (СД) и низкого (НД) давления. Последний отличается большей плотностью, повышенной механической прочностью и теплостойкостью, но менее эластичен по сравнению с полиэтиленом ВД. Полиэтилен перерабатывается в изделия методом литья под давлением (каркасы, катушки, панели и др.), прессования и экструзии (горячее шприцевание). Вследствие содержания от 60 до 90 % (НД) кристаллической фазы полиэтилены имеют ярко выраженную температуру плавления (105—140 °С). Полиэтилены при комнатной температуре не растворяются ни в одном из растворителей.

[4] У тонких (0,02—0,09 мм) полистирольных пленок (стиропленка) $E_{пр}=100\div120$ МВ/м. Предел прочности при растяжении у стиропленок равен 50—80 МПа. У полиэтиленовых пленок $E_{пр}=35\div70$ МВ/м, а предел прочности при растяжении 20—40 МПа.

[5] У тонких пленок и лент, полученных из фторопласта-3, $E_{пр}=80\div100$ МВ/м, а предел прочности при растяжении 30—40 МПа.

[6] У тонких пленок и лент, полученных из фторопласта-4, $E_{пр}=100\div120$ МВ/м, а предел прочности при растяжении 12—30 МПа.

[7] Фторопласт-3 при 300—315 °С и выше разлагается с выделением мономерагаза. Температура плавления 200—220 °С. При механических нагрузках применяется при температурах 70 °С. У фторопласта-4 процесс деполимеризации начинается с 400 °С и выше. Максимальная рабочая температура фторопласта-4 250 °С. У фторопласта-4 наблюдается текучесть при 20 °С (холодная текучесть) при механических напряжениях, превышающих 3 МПа. У фторопласта-3 холодная текучесть отсутствует. У всех фторопластов отмечается низкая короностойкость.

[8] Температура плавления капрона 210—220 °С. Рабочие температуры капрона не должны превосходить 100 °С. Температура плавления полиуретана 175—180 °С.

[9] Лавсан (пленки) используется также в композициях со слюдой или стеклотканью в качестве пазовой изоляции в электрических машинах в интервале температур от —55 до +120 °С.

[10] Винипласт — материал на основе поливинилхлорида (без пластификаторов) — изготовляется в виде пленок, листов и плит толщиной 0,3—20 мм, а также труб, стержней, уголков. Винипласт — термопластичный негорючий материал, хорошо сваривается, поддается механической обработке, очень стоек к химически активным средам (кислоты, щелочи, озон), растворителям и маслам. В ароматических и хлорированных углеводородах (бензол, толуол, хлорбензол и др.) частично растворяется. Температура разложения его 150—160 °С.

[11] Полиметилметакрилат выпускается в виде органического стекла (органическое стекло СО) и порошка, из которого получают (горячим прессованием или литьем под давлением) различные детали, стойкие к минеральным маслам, бензину и щелочам. При 250—300 °С материал разлагается, при воздействии электрической дуги выделяет газы, вызывающие гашение дуги, поэтому полиметилметакрилат применяют в трубчатых разрядниках. Органическое стекло штампуется при 80—120 °С.

[12] Данные таблицы относятся к гибким электроизоляционным пластикатам (светотермостойким), применяемым для изоляции проводов и кабелей, для изоляционных шлангов и трубок для липких изоляционных лент.

[13] Электроизоляционные и конструкционные детали из полиформальдегида изготовляют литьем под давлением.

[14] 2 р. 67 к за 1 кг лавсановой пленки толщиной 8—10 мкм.

Таблица 13.5. **Основные свойства электротехнических термореактивных пластмасс**

Наименование или марка пластмассы	Плотность, кг/м³	Разрушающее напряжение при			Теплостойкость по Мартенсу, °С (не менее)	Водопоглощаемость за 24 ч, %	Электрические параметры при 20 °С				Общая характеристика и цена за 1 кг
		растяжении, МПа	статическом изгибе, МПа	ударном изгибе, кДж/м²			ρ_v, Ом·м	ε_r	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	
03-010-02, 04-010-12, 09-200-07, Ж1-010-40, Ж5-010-78	1400—1450	35—50	60—70	4—6	125—135	0,20—0,30	10^6—10^7	6—9	0,08—0,15	8—10	Материалы на основе новолачных смол с органическими и минеральными наполнителями. Применение: конструкционные детали в электрических аппаратах и приборах и изоляционные детали в устройствах низкого напряжения. 39—70 коп.
Э2-330-02, Э1-340-02, Э3-340-65, Э9-342-73, Э10-342-63, Э3-340-61, Э6-014-30, Э11-342-61	1800—1900	25—55	35—50	3,5—6	150—200	0,03—0,09	10^{10}—10^{11}	6—8	0,01—0,03	15—18	Материалы на основе резольных смол с органическими или минеральными (слюда, кварцевая мука) наполнителями. Применение: электроизоляционные детали (основания, панели и др.) в электрических аппаратах и приборах. 44—58 коп.
КМК-218, ПК-9, ПК-10, КФ-9, КФ-10, ВПМ-1В, ВПМ-1К, КЭП-1, КЭП-2	1500—2000	20—70	50—90	6—60	250—350	0,08—0,3	10^{12}—10^{13}	3,5—5,5	0,005—0,028	5—8	Материалы на основе кремнийорганических смол и минеральных наполнителей. Применение: изоляционные изделия повышенной нагревостойкости и дугостойкости. 3 р. 55 к.
У1-301-07, У5-301-41, [illegible]-080 02	1450—1950	30—35	80—90	9—10	140—195	0,2—0,4	10^7—10^8	8—10	0,07—0,08	3—4	Материалы на основе модифицированных резольных смол и волокнистых наполнителей; отличаются повышенной механической прочностью. Применение: конструкционные и изоляционные детали. 63 к.—1 р.
АГ-4В, АГ-4С, АГ-4НС	1700—1900	50—60	150—400	50 200 250	280—300	0,02 0,02 0,02	10^{10}	7—8	0,03—0,05	13—15	Материалы на основе модифицированной формальдегидной смолы, стекловолокна АГ-4В или стеклонитей, обладают высокой теплостойкостью и механической прочностью при хороших электрических характеристиках.—2 р. 10 к.—3 р. 55 к.

13.5. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ БУМАГИ И КАРТОНЫ

Таблица 13.6. **Основные свойства электроизоляционных бумаг и картонов**

Материал	Марка	Толщина, мкм	Плотность, кг/м³	Разрывное усилие, Н, не менее	Воздухопроницаемость, мл/мин	Электрические параметры при 50 Гц и 20 °С		Общая характеристика и область применения	Цена за 1 кг
						tg δ при 50 Гц	$U_{пр}$, В		
Бумага конденсаторная	КОН-1	10, 11, 12, 13, 15, 22, 30	100	Разрывная длина 8000 м[1]	3—5	0,0014—0,0016	300—600	Применяется в бумажных конденсаторах	1 р. 56 к.—2 р. 21 к.
	КОН-2	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15—22, 30	1170	8000—8500 м	2—50[2]	0,0016—0,0018	240—680	То же, но с повышенной плотностью	2 р. 43 к.—10 р. 43 к.
	МКОН-08	10—15; 18, 20	800	800 м	7	0,0009	320—470	С улучшенными электрическими характеристиками	2 р. 70 к.—4 р. 05 к.
	МКОН-1	8—20, 30	1000	8000 м	3—5	0,0010—0,0012	340—620	То же	2 р. 70 к. —5 р. 20 к.
	МКОН-2	6—20, 30	1170	8000 м	2—30	0,0012—0,0015	300—680	» »	2 р. 10 к.—7 р. 20 к.
	МКОН-3	6—15	1130	850 м	—	0,0012—0,0015	310—520	» »	2 р. 33 к.—7 р. 70 к.
Бумага кабельная	К-080	80	780	40/85	40	Не нормируется	Не нормируется	Кабельная обыкновенная. Применяется для изоляции жил кабелей напряжением до 35 кВ включительно	43—46 коп.
	К-120	120	780	60/130	40	То же	То же		
	К-170	170	780	85/172	40	» »	» »		
	КМП-120	120	780	65/145	40	» »	» »	Кабельная упрочненная. Область применения та же, что и бумаг К	63 коп.
	КВМ-080	80	770	35/75	25	0,022	» »	Кабельная высоковольтная многослойная. Применяется для изоляции жил кабелей напряжением от 110 до 500 кВ	94 коп.—1 р. 07 к.
	КЭМ-120	120	770	65/145	25	0,022	» »		
	КВМСУ-080	80	1100	45/98	6	0,0026	То же	Область применения та же, что и бумаг КВМ	1 р. 15 коп.
	КВМСУ-120	120	1100	65/137	6				
Бумага кабельная полупроводящая[3]	КПУ-080	80	900	34/18	25	$\rho_V = 10^3$—10^5 Ом·м		Бумага с содержанием сажи. Применяется для экранирования жил кабелей	59—80 коп.
	КПУ-120	120	970	55/120	25				
	КПДУ-080	80	970	40/85	20			То же, но сажа вводится в один слой бумаги. Область применения та же, что и бумаг КПУ	80 коп.—1 р. 40 коп.
	КПДУ-120	120	970	55/120	20				
Бумага телефонная	КТ-50	50	800	20/60	—	Не нормируется	Не нормируется	Применяется для изоляции жил телефонных кабелей	53 коп.

Бумага крепированная	ЭКТМ	440	130	44—46 (в продольном направлении)	—	Не нормируется	44 МВ/м[7]	Применяется для изоляции отдельных узлов маслонаполненных аппаратов	80 коп
Картон электроизоляционный (для работы в воздушной среде)[6]	ЭВС	0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40 мм	1250	34—127 МПа	—	Не нормируется	12 МВ/м[4]	—	93 коп.
	ЭВП	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30	1250	34—127 МПа	—	То же	12 МВ/м[4]	Картон каландрированный выпускается в листах и в рулонах (ЭВ, ЭВС) или только в рулонах (ЭВП, ЭВТ). Применяется для работы в воздушной среде (каркасы катушек, прокладки и др.) с последующей пропиткой лаками	84 коп.
	ЭВТ	0,10; 0,15; 0,20 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,50 мм	1150	31—120 МПа	—	» »	12—13 МВ/м[4]		86 коп.
	ЭВ	Те же размеры и 0,6; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0; 2,5; 3,0 мм	1200	25—90 МПа	—	» »	8—11 МВ/м[4]		72—82 коп.
Картон электроизоляционный для аппаратов с масляным заполнением[6]	А	2,0; 2,5; 3,0 мм	900—1000	40 МПа	Не нормируется	» »	40—50[5]	Эластичный гибкий картон. Применяется в трансформаторах напряжением до 700 кВ включительно (цилиндры и др.)	74 коп.
	Б	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 мм	950—1000	50 МПа			51—85[5]	Плотный. Применяется в аппаратах напряжением до 220 кВ	70 коп.
	В	2,0; 2,5; 3,0 мм	1250	60 МПа			55—70[5]	Картон твердый с малой сжимаемостью. Применяется в продольной изоляции трансформаторов и др.	76 коп.
	Г	0,5; 1,0; 1,5	900—1000	36 МПа			48—57[5]	Картон с повышенным сопротивлением расслаиванию	56—70 коп.
Фибра листовая	ФЭ	От 0,4 до 1,7 (через 0,1 мм); 2,0; 2,2; 2,5; 3,0	1100—1200	Вдоль: 70 МПа	То же	» »	3,5—7,5 МВ/м[4]	Фибра электроизоляционная (прокладки, шайбы)	1 р. 83 коп.

[1] Для конденсаторных бумаг приведены наименьшие значения разрывной длины (м), т. е. длины, при которой наступает разрыв бумаги данной толщины под действием собственного веса.

[2] Бо́льшие значения воздухопроницаемости относятся к конденсаторным бумагам меньшей толщины (4—5 мкм).

[3] Меньшие значения разрывных усилий кабельных бумаг (числитель) относятся к образцам, вырезанным в поперечном направлении полотна бумаги. Разрывное усилие прикладывается к полосе бумаги шириной 15 мм.

[4] Для фибры и картонов при работе этих материалов в воздушной среде нормируются значения электрической прочности.

[5] Для картонов марок А, Б, В и Г приведены испытательные напряжения, которые прикладываются к образцам картона в течение 1 м. Бо́льшие значения напряжения относятся к образцам большей толщины.

[6] Для картонов и фибры приведены значения предела прочности образцов материала при растяжении (МПа).

[7] В масле при 90 °С.

13.6. СЛОИСТЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПЛАСТМАССЫ

Таблица 13.7. Основные размеры и области применения слоистых электроизоляционных пластмасс

Материал	Марка	Номинальная толщина листов, мм	Площадь листов, мм²	Преимущественное назначение и цена за 1 кг
Гетинакс	I	0,2; 0,25; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,3; 2,5; 2,8; 3,0; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5,0; 6; 6,3; 6,5; 7; 7,3; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 44; 46; 48; 50	550×700 650×930 930×1030 930×1430	Для работы на воздухе при нормальных климатических условиях при 50 Гц и напряжении до 1000 В или в трансформаторном масле. 1 р. 00 к. — 3 р. 95 к.
	II	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,3; 2,5; 2,8; 3,0; 3,3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5,5; 6; 6,3; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 44; 46; 48; 50	То же	То же с более широкими допусками по толщине; коробление не нормируется. 90 коп. — 1 р. 90 к.
Гетинакс	III	5; 5,5; 6; 6,3; 6,5; 7; 7,3; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 44; 46; 48; 50	» »	Для работы в условиях повышенной влажности при 50 Гц и напряжении до 1000 В. 1 р. 00 к.
	V	5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9	» »	То же, что марка I при 50 Гц и напряжении выше 1000 В
	V—I, V—II	Выпускаются той же толщины, что и гетинакс марки III	» »	Для работы в трансформаторном масле при 50 Гц и напряжении выше 1000 В или на воздухе в нормальных климатических условиях. 1 р. 90 к. — 2 р. 65 к.
	VI	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,3; 3,5; 3,8	» »	Для работы на воздухе в нормальных климатических условиях при 10^6 Гц и напряжении до 1000 В. 1 р. 90 к.—2 р. 65 к.
	VII	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,3; 3,5; 3,8	» »	То же, но с улучшенным тангенсом угла диэлектрических потерь и с пониженной стойкостью к кратковременному нагреву. 1 р. 90 к.— 1 р. 40 к.
	VIII	0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3,0; 3,3; 3,5; 3,8	» »	Для работы в нормальных климатических условиях при 10^6 Гц и напряжении до 1000 В — для изготовления печатных плат. 2 р. 65 к.
Текстолит	А	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5; 5,5; 5,6; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 28; 30; 32; 33; 35; 36; 38; 40; 42; 45; 48; 50	Не менее 450×600	Для работы в трансформаторном масле и на воздухе при 50 Гц с повышенными электрическими характеристиками. 2 р. 75 к.— 3 р. 55 к.
	Б	Выпускается той же толщины, что и текстолит марки А	То же	Для работы на воздухе при частоте 50 Гц с повышенными механическими характеристиками. 2 р. 80 к.—3 р. 85 к.
	Г	Выпускается той же толщины, что и текстолит марки А	» »	Для работы в трансформаторном масле и на воздухе, но с расширенными допусками по толщине и короблению. 3 р. 20 к.—5 р. 85 к.

Продолжение табл. 13.7

Материал	Марка	Номинальная толщина листов, мм	Площадь листов, мм²	Преимущественное назначение и цена за 1 кг
Текстолит	ВЧ	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 3,8; 4; 4,3; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8,0	Не менее 450×600	Для работы на воздухе в нормальных климатических условиях при 10^6 Гц. 10 р. 60 к.—10 р. 80 к.
Стеклотекстолит	СТ	1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30	(450—980)× ×(600—1480)	Для работы при напряжении до 1000 В и 50 Гц на воздухе при нормальных климатических условиях (до 130 °С). 2 р. 80 к.
	СТ-I	0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30	То же	То же, но с более однородной внутренней и поверхностной структурой в исходном состоянии и после механической обработки. 3 р. 35 к.—4 р. 00 к.
	СТ-II	0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5	» »	С повышенной жесткостью при рабочих температурах. Для работы при напряжении до 1000 В и 50 Гц на воздухе в нормальных климатических условиях. 4 р. 60 к.
	СТЭФ	1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 2,8; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30; 35; 40; 50	» »	Для работы при напряжении выше 1000 В и 50 Гц в нормальных условиях на воздухе, а также до 1000 В во влажной атмосфере при 35 °С. 4 р.
	СТЭФ-I	0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 1,8; 2; 2,3; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8, 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 30; 35; 40; 50	» »	То же, но с более однородной внутренней и поверхностной структурой в исходном состоянии и после механической обработки. 4 р. 00 к.—6 р. 20 к.
	СТ-Б	Выпускается той же толщины, что стеклотекстолит марки СТ, но с расширенными допусками по толщине	» »	Для работы при напряжении до 1000 В на воздухе в нормальных условиях до 130 °С. 2 р. 80 к.—3 р. 25 к.
	СТВК	От 0,35 до 30	» »	Для работы в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха 95 % при температуре 35 °С) при напряжении до 1000 В и 50 Гц. 8 р. 80 к.—11 р. 50 к.
	СТК	Те же толщины, что у СТЭФ-I		
Асботекстолит	АСТ-А	6; 8, 10; 12; 15; 16; 18; 20; 22; 23; 25; 28; 30; 32; 35; 37; 38; 40; 42; 44; 46; 48; 50; 52; 55; 58; 60	(450—1000)× ×(600—2480)	Материал на основе асбестовой ткани и бакелитовой смолы. Нагревостойкость 130 °С. Применяется для клиньев и распорок, в роторах турбогенераторов и другом электрооборудовании. 2 р. 30 к.
	АСТ-Б	Те же размеры	То же	То же, но с более однородной структурой и повышенными механическими свойствами. 3 р. 05 к.
Дельта-древесина	ДСП-В-3	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 10; 12; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60	(700—5600)× ×(800—1200)	Для конструкционных и электроизоляционных деталей, работающих в трансформаторном масле; для работы на открытом воздухе (растяжки троллейных проводов) требуют защиты от влаги. 1 р. 40 к.
	ДСП-Б-Э	15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60	(700—5600)× ×(1000—1200)	То же, но обладает менее высокой механической прочностью и несколько пониженными электрическими характеристиками. 81 коп.

Таблица 13.8. **Физико-механические свойства слоистых электроизоляционных пластмасс**

Материал	Марка	Плотность, кг/м³	Ударная вязкость[1], кДж/м², не менее	Разрушающее напряжение, МПа, при		Теплостойкость по Мартенсу, °С, не менее	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
				растяжении не менее	статическом изгибе[2] не менее		
Гетинакс	I	1350—1450	20/11,8	98	122	150	0,170—0,175
	II	1350—1450	20/11,8	98	122	150	
	III	1300—1400	18/—	80	118	150	
	V-I; V-II	1280—1400	18/11,8	88	122	150	
	VI	1300—1400	—	88	—	—	
	VII	1350—1450	—/10	98	—	—	
	VIII	1300—1400	—/10	88	—	—	
Текстолит	А	1300—1450	12—26	33—40[5]	83—90[5]	135—150	0,146—0,162
	Б	1300—1450	15—31	45—54	83—107	135—150	
	ВЧ	1300—1450	—	45—88	—[4]	—	
	Г	1300—1450	15—28	35—49	70—140	78—89	
Стеклотекстолит[3]	СТ	1600—1850	15/—	70	93	185	0,178—0,182
	СТ-I	1600—1850	19/—	75	98	185	
	СТ-II	1600—1850	25/—	107	274	185	
	СТЭФ	1600—1850	60/—	196	—	185	
	СТЭФ-I	1600—1850	63/—	215	294	185	
	СТК	1600—1850	50/—	90	—	250	
	СТВК	1600—1850	—	79	98	250	
	СТ-6	1600—1855	15/—	70	93	185	
Асботекстолит	АСТ-А	1550	20	75	93	155	—
	АСТ-Б	1650	20	80	107	155	
Дельта-древесина	ДСП-В-Э	1300—1400	30	137	180	140	0,164—0,168
	ДСП-Б-Э	1300—1400	80	255	274	150	

[1] В числителе указаны значения для гетинакса толщиной 10 мм и более, в знаменателе — от 1,0 до 9,5 мм.

[2] Ударная вязкость и разрушающее напряжение при статическом изгибе определяются в направлении, перпендикулярном слоям — у всех слоистых материалов.

[3] При определении механических характеристик у стеклотекстолита образцы этого материала вырезают вдоль утка ткани.

[4] У этих материалов разрушающее напряжение при статическом изгибе не определяется из-за малой толщины материалов.

[5] Для текстолита толщиной 10 мм.

Таблица 13.9. **Электрические свойства слоистых электроизоляционных пластмасс**

Материал	Марка	Электрические параметры при 20 °С			$E_{пр}$, перпендикулярно слоям, МВ/м
		ρ_V, Ом·м	ε_r при 50 Гц	tg δ при 50 Гц	
Гетинакс	I	10^{-8}—10^{10}	6—8	0,04—0,06	12—20
	II	10^{8}—10^{9}	6—8	0,05—0,08	12—22
	III	10^{8}—10^{10}	6—8	0,03—0,06	13—23
	V-I; V-II	10^{9}—10^{10}	6—8	0,02—0,04	20—28
	VI	10^{8}—10^{9}	6—7[1]	0,04—0,06[1]	20—35
	VII	10^{9}—10^{10}	6—7[1]	0,03—0,04[1]	22—35
	VIII	10^{9}—10^{11}	6—7[1]	0,02—0,03[1]	25—35
Текстолит	А	10^{8}—10^{9}	7—8	0,06—0,19	При 90 °С 5—10
	Б	10^{7}—10^{8}	7—8	—	При 90 °С 3—6
	ВЧ	10^{9}—10^{10}	6—8[1]	0,05—0,06[1]	При 90 °С 5—10
	Г	10^{8}—10^{9}	5—6	—	
Стеклотекстолит	СТ	10^{8}—10^{9}	7—9	—	При 90 °С 6—8 (в масле)
	СТ-I	10^{8}—10^{9}	7—8	—	7—9; 7—12
	СТ-II	10^{10}—10^{11}	7—8	—	12—16
	СТЭФ	10^{11}—10^{12}	7—8	0,02—0,03	20—22
	СТЭФ-I	10^{11}—10^{12}	7—8	0,02—0,03	20—27
	СТК	10^{10}—10^{11}	6—7	0,04—0,06	8—14
	СТВК	10^{10}—10^{11}	6—7	0,006—0,009	8—10
	СТ-Б	10^{8}—10^{9}	7—8	—	7—9
Асботекстолит	АСТ-А, АСТ-Б	10^{6}—10^{7}	7—8		1,0—1,5
Дельта-древесина	ДСП-В-Э	10^{9}—10^{10}	7—8	0,06—0,2	6—9
	ДСП-Б-Э	10^{8}—10^{9}	7—8	0,08—0,3	5—8

[1] При частоте 10^6 Гц.

13.7. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СОСТАВЫ (КОМПАУНДЫ)

Таблица 13.10. **Основные свойства электроизоляционных составов (компаундов)**

Классификация по назначению	Марка или обозначение компаунда	Составляющие части	Температура размягчения, °С	Холодостойкость, °С (не выше)	Объемная усадка при охлаждении, % (не более)	Электрические характеристики			Общая характеристика и области применения	Цена за 1 кг
						ρ_V, Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м	tg δ при 50 Гц		
Пропиточные	225[1]	Битум ухтинский, канифоль, масло льняное обезвоженное	93—102[2]	—25	8,0—8,5	10^{11}—10^{12}	20—22	0,02—0,03	Блестящая аморфная водостойкая масса черного цвета. Применяется для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов (пропитка при 160 °С под давлением). Нагревостойкость 105 °С	1 р. 15 к.
	Битумный[3]	Битум марок БН-V, БН-III-VB и специальный	95—100[2]	—22	8,5—9,5	10^{10}—10^{11}	15—20	0,03—0,05	То же, но менее эластичная масса. Применяется для пропитки катушек (при 140—150 °С) под давлением. Нагревостойкость 105 °С	35 коп.
	КГМС-1[4]	Непредельный полиэфир № 1, стирол, перекись бензола, гидрохинон	250	—60	6—7	10^{11}—10^{12}	18—22	0,02—0,04	Аморфная масса желтого цвета, обладающая хорошей адгезией, высокой механической прочностью и водостойкостью. Применяется для пропитки обмоток трансформаторов и аппаратов	2 р. 30 к.
	КГМС-2[4]	Непредельный полиэфир № 2, стирол, перекись бензоила, гидрохинон	250	—60	8—10	10^{11}—10^{12}	18—20	0,02—0,04	То же, но отвердевший компаунд обладает большей эластичностью	2 р. 90 к.
	К-43	Состав на основе полиметилфенилсилоксана и линолеата свинца	Не размягчается[5]	—60	5—8	10^{12}—10^{13}	35—50	0,005—0,008	Пропитка обмоток электрических машин и аппаратов, длительно работающих при 180 °С в условиях высокой влажности	3 р. 15 к.
	КП-10	Смесь полиэфиров с полиэфиракрилатами и сиккативом. Компаунд холодного отверждения	То же	—50	—	10^{10}—10^{11}	20—22	0,02—0,3	Термореактивная масса. Обеспечивает высокую цементацию и малое время сушки. Нагревостойкость 120 °С. Применяется для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов	2 р. 10 к.
Пропиточные	КП-18	То же, но в другом соотношении	То же	—50	—	10^{10}—10^{11}	28—32	0,02—0,04	То же, но более стабилен. Нагревостойкость 130 °С	1 р 80 к.
	Д-1 Д-112	Составы на основе эпоксидной смолы ЭД-16 и отвердителей	Не размягчается	—50	0,5—1	10^{10}—10^{12}	28—30	0,01—0,02	Термореактивные массы. Нагревостойкость 130 °С. Применяется для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов	
	Д-61	Состав на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителей	То же	—50	0,5—1	10^{11}—10^{12}	45—50	0,01- 0,02	То же, но с меньшей вязкостью и большей пропитывающей способностью	4 р. 60 к.
	К-67, К-67Ф	Состав на основе алиговинилсиликонов	» »	—60 —60	5—6 6—8	10^{12}—10^{13} 10^{11}—10^{12}	22 20	0,015 0,06	Компаунды горячего отверждения ступенями при 90 и 120 °С. Нагревостойкость 180 °С	2 р. 10 к.
Пропиточно-заливочные[7]	МБК-1	Метакриловый эфир	250	—60	0,5	10^{10}—10^{11}	10—12	0,05—0,03	Пропитка обмоток электрических машин и заливка катушек и блоков электрических аппаратов[6]	2 р. 50 к.

Продолжение табл. 13.10

Классификация по назначению	Марка или обозначение компаунда	Составляющие части	Температура размягчения, °С	Холодостойкость, °С (не выше)	Объемная усадка при охлаждении, % (не более)	Электрические характеристики			Общая характеристика и области применения	Цена за 1 кг
						ρ_V, Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м	tg δ при 50 Гц		
Пропиточно-заливочные[7]	МБК-2	Метакриловый эфир и пластификатор	200	—60	0,5	10^9—10^{10}	15—18	0,03—0,04	То же, но для получения более эластичной пропитки[6]	3 р. 60 к.
	МВК-3	То же	200	—60	0,5	10^9—10^{10}	10—12	0,03—0,04	То же, но для получения резиноподобной эластичной пропитки или заливочного блока[6]	3 р. 85 к.
	ЭПК-5[9]	Эпоксидная смола Э-37, полиэфир № 220, фталевый ангидрид, пылевидный кварц	120[8]	—40^{12}	0,6—1,0	10^{12}—10^{13}	25—30	0,01—0,03	Применяется для литой изоляции трансформаторов тока до 10 кВ, работающих при температуре до 120 °С	3 р. 50 к.
	К-168[10]	Эпоксидная смола ЭД-16, полиэфир МГФ-9, гексаметилендиамин	120[10]	—60	0,5—1,5	10^{10}—10^{13}	25—30	0,06—0,09	Применяется для литой изоляции трансформаторов тока до 10 кВ, работающих при температуре 120 °С, отверждение компаунда при 20 °С	5 р. 20 к.
	К-293[11]	Эпоксидная смола, полиэфир МГФ-9, пылевидный кварц, дибутилфталат	150[11]	—60	1—2	10^{10}—10^{12}	20—25	0,05—0,08	То же, но отверждение компаунда происходит при 120 °С. Кратковременно может работать при 150 °С	6 руб.
Заливочные	К-30К	Полиуретановый компаунд с наполнителем — пылевидным кварцем	Не размягчается	—80	2—3	10^{10}—10^{12}	21—23	0,05—0,08	Эластичная масса. Применяется для заливки различных узлов электрических приборов и аппаратов, работающих при температуре до +150 °С	2 р. 90 к.
	К-31	То же, но без наполнителя	То же	—80	3—4	10^{12}—10^{13}	27—29	0,07	То же, но при температуре до 120 °С	2 р. 70 к.
	ЭК-3	Эпоксидная смола ЭД-16 с отвердителем	150	—50	1—2	10^{12}—10^{13}	45—47	0,03	Твердая хрупкая масса с высокой клеящей способностью. Применяется при температуре до +150 °С	4 р. 10 к.
	Виксинт К-18	Кремнийорганический компаунд	150	—60	2—3	10^{10}—10^{12}	15—18	0,01—0,02	Нагревостойкая (до 200 °С), водостойкая эластичная масса белого цвета. Применяется для герметизации узлов электрических приборов и аппаратов	4 руб.
	Т-10[9]	Эпоксидно-кремнийорганический компаунд с наполнителем	150	—60	1—2	10^{12}—10^{14}	20—25	0,005	Нагревостойкая (до 200 °С), водостойкая твердая масса с хорошей адгезией к металлам, стеклам и керамике. Применяется для герметизации электрических узлов и аппаратов	3 руб.

Заливочные компаунды для кабельных муфт и воронок	МК-45	Канифоль, минеральное масло (автол или цилиндровое масло)	45—48[13]	—8	6—7	10^9—10^{10}	12—18	—	Заливка кабельных соединительных и концевых муфт на 35 кВ и прошпарка концов кабелей на рабочие напряжения до 3 кВ	1 р. 44 к.
	МБ-70	Битумы марок БН-V и БН-III	70—73[13]	—10	8—9	10^{10}—10^{11}	14—16	—	Заливка соединительных муфт и концевых воронок до 10 кВ, проложенных в земле или установленных в неотапливаемых помещениях (до —10 °С)	32 коп.
	МБ-90	Битумы марок БН-V и БН-III или Г и БН-III	90—92[13]	—10	8—9	10^{10}—10^{11}	14—16	—	Заливка соединительных и концевых воронок до 10 кВ, установленных в отапливаемых помещениях	35 коп.
	МБМ-1	Битумы марок БН-V, БН-III и масло трансформаторов	55—62[13]	—35	7—8	10^{10}—10^{11}	15—17	—	То же, но в наружных электроустановках с температурой до —35 °С	18 коп.
	МБМ-2	То же, но в другом соотношении	55—60[13]	—45	7—8	10^{10}—10^{11}	15—17	—	То же, но в наружных электроустановках с температурой до —45 °С	18 коп.

[1] Этот компаунд известен под маркой 225-Д. Отвержденный компаунд 225 имеет плотность 980—1000 кг/м³. Наибольшая допустимая рабочая температура обмоток, пропитанных этим компаундом, 105 °С.

[2] Температура размягчения по методу «кольца» и «шара».

[3] Отвержденный битумный компаунд имеет плотность 990—1050 кг/м³. Наибольшая допустимая рабочая температура компаунда 105 °С.

[4] Компаунды КГМС-1 и КГМС-2 в исходном состоянии представляют собой жидкости с высокой пропитывающей способностью (110—120 листов микалентной бумаги). Предварительно высушенные обмотки пропитываются этими компаундами при комнатной температуре (в тренировочном режиме). Отверждение (полимеризация) компаундов производится при 60—100 °С. В отвержденном состоянии компаунды КГМС-1 и КГМС-2 являются термореактивными веществами, размягчающимися только с поверхности (при 250 °С). Они могут длительно работать при температурах от —60 до +120 °С (класс нагревостойкости Е).

[5] Теплостойкость (термоэластичность пленки компаунда К-43) на медной подложке при 200 °С 150—350 ч; tg δ при 180 °С 0,013—0,035. Пропитка обмоток производится при 55—65 °С в тренировочном режиме.

[6] Пропитку обмоток производят предварительно вакуумированным составом, нагретым до 50—60 °С.

[7] Компаунды МБК могут применяться в интервале температур от —60 до +105 °С (без наполнителя) и от —60 до +120 °С с наполнителем (пылевидный кварц). В отвержденном состоянии наибольшей механической прочностью при растяжении (7 МПа) обладает компаунд МБК-1. В исходном состоянии компаунды МБК представляют собой жидкости, которые превращаются в твердые термореактивные вещества при 20 °С (с введением отвердителей) или при 70—90 °С (без введения отвердителей). В исходном состоянии компаунды МБК инертны по отношению к меди, устойчивы против растрескивания и обладают высокими влаго-, водостойкостью и механической прочностью. Компаунд МБК-1 в отвержденном состоянии образует твердую неэластичную аморфную массу, а компаунды МБК-2 и МБК-3 образуют твердые эластичные массы. Компаунды МБК в жидком состоянии разрушают резиновые материалы, поэтому последние не могут применяться при заливке этими компаундами.

[8] Теплостойкость по Мартенсу отвержденного компаунда 70 °С. Нагревостойкость 120 °С.

[9] Эпоксидно-полиэфирные компаунды с кварцевым наполнителем. Плотность 1700—1800 кг/м³. Водопоглощаемость за 10 сут при 20 °С 0,094—0,090 %. Относительная диэлектрическая проницаемость отвержденного компаунда 5—6, ударная вязкость отвержденного компаунда 4—6 кДж/м³. Заливку компаунда производят в предварительно нагретые стальные формы, смазанные кремнийорганической смазкой К-10. Отверждение компаунда происходит в течение 20—32 ч при 120 °С в зависимости от габаритов заливаемых компаундом изделий.

[10] Нагревостойкость при 120 °С (класс нагревостойкости Е). Компаунд К-168 отверждается (при 20 °С) в течение 18—24 ч; «срок жизни» приготовленного компаунда 20—35 мин. Отвержденный компаунд стоек к воде, грибковой плесени и обладает высокой механической прочностью.

[11] Нагревостойкость 120 °С (класс нагревостойкости Е). Компаунд К-293 отверждается при 120 °С в течение 2 ч. «Срок жизни» подготовленного к заливке компаунда находится в пределах 30—240 мин. В отвержденном состоянии компаунд обладает высокой стойкостью к воде и грибковой плесени и имеет высокую механическую прочность.

[12] Холодостойкость —40 °С в толстом слое (30—50 мм), в тонких же слоях (на медных пластинах) — 60 °С.

[13] Температура каплепадения (по Уббелоде).

13.8. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ЛАКОТКАНИ

Таблица 13.11. **Основные свойства электроизоляционных лакотканей**

Марка лакоткани	Основа лакоткани	Пропиточный состав	Номинальная толщина, мм	Разрушающее напряжение при растяжении, Н/см (по основе), не менее	ρ_V Ом·м, не менее	$U_{пр}$ кВ, не менее: при 15—40 °С и относительной влажности 45—75 %	$U_{пр}$ кВ, не менее: после 24 ч пребывания во влажной атмосфере	Нагревостойкость, °С	Цена за 1 м (при ширине 0,7—0,9 м)
ЛХМ-105	Хлопчатобумажная	Масляный лак	0,15; 0,17 0,24; 0,30	38—60	10^{11}	4—9,5	1,6—4,8	До 105 °С	1 р. 65 к.
ЛХМС-105	То же	То же	0,17; 0,20	44—60	10^{11}	4,5—7,6	2,1—4,1	До 105 °С	1 р. 75 к.
ЛХММ[2]-105	» »	» »	0,17; 0,20; 0,24	44—58	10^{11}	4,8—9,2	2,0—4,2	До 105 °С	2 р. 80 к.
ЛХБ-105	» »	Битумно-масляный лак	0,17; 0,20; 0,24	44—58	10^{11}	4,5—9,2	2,0—3,6	До 105 °С	1 р. 70 к.— 2 р. 80 к.
ЛШМ-105	Шелковая	Масляный лак	0,08; 0,10; 0,12; 0,15	16—24	10^{11}	1,0—8,5	1,4—3,8	До 105 °С	5 р. 80 к.
ЛШМС-105	»	То же	0,04; 0,05 0,06	11—22	10^{12}	1,0—9,3	2,0—4,2	До 105 °С	5 р. 70 к.
ЛКМ-105	Капроновый шелк	» »	0,10; 0,12; 0,15	24—38	10^{11}	3,6—7,8	1,7—4,2	До 105 °С	5 р. 00 к.
ЛСМ-105/120	Стеклянная	» »	0,15; 0,17; 0,20; 0,24	85—120	10^{11}	3,2—8,0	1,5—4,2	До 120 °С	1 р. 10 к.
ЛСММ[2]-105/120	То же	» »	0,17; 0,20; 0,24	95—120	10^{11}	4,0—9,2	2,3—4,6	До 120 °С	1 р. 90 к.
ЛСЛ-105/120	» »	Гутадиенстирольный латекс	0,15; 0,17; 0,20; 0,24	85—120	10^{12}	3,2—8,4	1,3—3,5	До 120 °С	85 коп.
ЛСЭ-105/130	» »	Состав на основе синтетического каучука	0,12; 0,15; 0,17; 0,20; 0,24	70—120	10^{12}	2,6—9,6	1,7—3,6	До 130 °С	1 р. 10 к.
ЛСБ-120/130	» »	Битумно-масляно-алкидный лак	Те же толщины	70—120	10^{12}	2,6—10	1,9—4,1	До 130 °С	1 р. 20 к.
ЛСП-130/155	» »	Полиэфирно-эпоксидный лак	0,08; 0,10; 0,12; 0,15; 0,17	35—95	10^{10}	0,8—9,0	0,8—3,5	До 155 °С	1 р. 65 к.
ЛСК-155/180	» »	Кремнийорганический лак	0,06; 0,08; 0,10	35—45	10^{12}	1,2—9,0	0,8—5,0	До 180 °С	1 р. 25 к.— 2 р. 35 к.
ЛСК-2	» »	Кремнийорганическая эмаль	0,12; 0,15; 0,17; 0,20	70—150	10^{11}	2,5—7,5	1,3—4,2	До 180 °С	2 р. 60 к.
ЛСКР-180	» »	Состав на основе кремнийорганического каучука	Те же толщины	70—150	10^{12}	0,7—4,9	0,6—2,7	До 180 °С	2 р. 15 к.
ЛСК-5	» »	Полупроводящая кремнийорганическая эмаль	0,12; 0,15; 0,20	70—100	Не более 10^5	—	—	До 180 °С	2 р. 60 к.

[1] Значения пробивных напряжений при электродах диаметром 6 мм. Меньшие значения пробивного напряжения относятся к ослабленным местам в образцах лакотканей наименьшей толщины.

[2] ЛХММ — хлопчатобумажная маслостойкая; ЛСММ — маслостойкая стеклянная.

13.9. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ НАМОТАННЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Таблица 13.12. **Размеры намотанных электроизоляционных изделий**

Классификация по основе	Наименование и марка изделия	Основные размеры, мм					Цена за 1 кг
		Внутренний диаметр	Промежуточные значения внутреннего диаметра (кратные)	Толщина стенки, мм	Длина, мм	Промежуточные значения длины (кратные)	
Бумажно-бакелитовые	Трубки ТБ	6—30	8; 10; 12; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 24; 25; 26; 28; 30	1,5—10	200—1000	5	2 р. 70 к.—3 р. 15 к.
	Цилиндры ЦБ	105—500	5	2,0—20	1010—2200	10	2 р. 20 к.
		510—1200	10	4—25	1010—2200	10	
Текстолитовые на бакелитовом связующем	Трубки ТХ	10—80	2 или 5	2,5—10	630	—	16 руб.
	Цилиндры ЦХ1 и ЦХ2	85—400	5	4—20	630 и 830	—	10 р. 20 к.—11 р. 50 к. (ЦХ1) 4 р. 95 к. (ЦХ2)
	Стержни	Наружный диаметр 8—60	8; 13; 18; 25; 40; 50; 60	—	200; 350; 500; 550		3—9 руб.
Стеклотекстолитовые на эпоксидном связующем	Трубки ТСЭФ	10—20	2 или 5	2—5	650; 750	—	8 р. 10 к.
	Цилиндры ЦСЭФ	22—80	2 или 5	2—10	650; 750	—	10 р. 50 к.
		85—400	5	3—20	650; 750;	—	5 р. 40 к.
		410—600	10	4—20	850	—	
	Цилиндры ЦСЭФВ	90—140	5	10—20	275—840	40	6 руб.

Таблица 13.13. **Основные свойства намотанных электроизоляционных изделий**

Классификация[1]	Наименование изделий	Марка	Физико-механические параметры				Электрические параметры при 20 °С		
			Плотность, кг/м³	Разрушающее напряжение МПа		Водопоглощаемость, %	ρ_S Ом	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м
				при изгибе	при сжатии вдоль оси				
Бумажно-бакелитовые	Трубки	ТБ	1050—1100	78—90	40—50	3,5—4,5	10^8—10^{10}	0,02—0,03	4—14
	Цилиндры	ЦБ	1050—1100	78—90	—	2,5—4,0	10^8—10^{10}	0,02—0,03	6—12
Текстолитовые на бакелитовом связующем	Трубки	ТХ	1050—1100	80—90	45—55	2,5—5,0	10^8—10^{10}	0,02—0,05	6—10
	Цилиндры	ЦХ1, ЦХ2	1050—1100	80—90	45—55	1,5—4,0	10^8—10^{10}	0,01—0,04	8—12
	Стержни	—	1250—1400	98—118	40—98[2]	0,8—0,9	10^8—10^{10}	—	8—9[3]
Стеклотекстолитовые на эпоксидном связующем	Трубки	ТСЭФ	1400	180	70	0,8—0,9	10^{10}—10^{11}	0,02—0,03	3,0—4,5
	Цилиндры	ЦСЭФ	1450	—	—	—	10^{10}—10^{11}	0,03—0,04	3,0—5,0
		ЦСЭФВ	1550	—	80	—	10^{10}—10^{11}	0,01—0,02	3,5—5,0

[1] По нагревостойкости бумажно-бакелитовые и текстолитовые изделия относятся к классу А (до 105 °С). Стеклотекстолитовые изделия на эпоксидном связующем относятся к классу Е (до 155 °С), стеклотекстолитовые изделия нагревостойкие на кремнийорганическом связующем — к классу Н (до 180 °С).

[2] Текстолитовые стержни испытывают на растяжение ($\sigma_р$=40÷95 МПа). Бо́льшие значения предела прочности при растяжении относятся к изделиям диаметром 8 мм.

[3] У текстолитовых стержней определяется электрическая прочность в направлении параллельном слоям.

13.10. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЛЮДЫ

Таблица 13.14. **Основные свойства клееных электроизоляционных материалов на основе натуральной слюды**

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические параметры при 20 °С			Область применения	Цена за 1 кг
			ρ_V, Ом·м	tg δ	$E_{пр}$, МВ/м		
Миканит коллекторный	КФШ, КФГ, КФП, КФП-1	0,4; 0,5; 0,6; 0,7 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5	10^{10}—10^{12}	0,01—0,03	19—20	Твердые электроизоляционные прокладки между коллекторными пластинами в электрических машинах	12—37 руб.
	КФШ-1	0,7; 0,8; 0,9; 1,0 до 1,5	10^{10}—10^{12}	0,01—0,03	19—22		18—38 руб.
	КФГС	0,4; 0,5; 0,6	10^{10}—10^{12}	0,01—0,03	19—22		18—38 руб.
Миканит коллекторный на аммофосе	КФА	0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2	10^{11}—10^{12}	0,008—0,01	20—23	То же, но в электрических машинах нагревостойкого исполнения (выше 180 °С)	24—47 руб.
Миканит прокладочный	ПМГ, ПФГ, ПСГ, ПФК	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 5,0	10^{11}—10^{12}	0,03—0,05	16—20	Твердые электроизоляционные прокладки и шайбы в электрических машинах и аппаратах	8—17 руб.
Миканит формовочный	ФМГ, ФМГА, ФФГ, ФФГА	0,4; 0,45; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5	10^{9}—10^{11}	—	25—40	Электроизоляционные изделия фасонного профиля (конусы, манжеты коллекторные и др.), получаемые горячим прессованием из формовочного миканита	26—108 руб.
	ФМП, ФМПА, ФФП, ФФПА	0,15; 0,2; 0,25; 0,3 (0,4; 0,5 для ФФП и ФФПА)					
	ФМК, ФФК, ФФКА	0,15; 0,2; 0,25 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5					
Миканит гибкий	ГМС, ГФС	0,15	10^{11}—10^{12}	0,03—0,08	16—28	Пазовая и межвитковая изоляция, а также гибкие прокладки в электрических машинах	26—78 руб.
	ГМЧ, ГФЧ, ГФК	0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5					
	ГМ-ББ, ГФ-ББ, ГМЧ-ББ, ГФЧ-ББ	0,2; 0,25 0,3; 0,4 0,5					
Стекломиканит гибкий	ГФС-Т, ГФК-Т	0,2; 0,25; 0,3; 0,5	10^{10}—10^{11}	—	14—17	То же, но с повышенной нагревостойкостью (класс В — на глифталевом лаке; класс F — на полиэфирном лаке; класс С — на кремнийорганическом лаке)	22—44 руб.
	ГФС-ТТ, ГФЭ-ТТ, ГФЭ-ТТ-1	0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,6					
	ГФК-ТТ, ГФК-ТТ-1	0,3; 0,4; 0,5; 0,6					
Микафолий	МФГ-Б, МФШ-Б, ММГ-Б, ММШ-Б, МФГ-Т, МФГ-С, МФП-Т, МФП-С	0,15; 0,2; 0,25; 0,3	10^{9}—10^{11}	—	14—18	Формирующийся в нагретом состоянии материал (изоляционные гильзы, трубки и др.)	17—58 руб.
	МФК-Т, МФК-С, ММГ-Т, ММГ-С, ММК-Т, ММК-С	0,2; 0,25; 0,3					
Микалента	ЛФЧ-Б, ЛФК-Т ЛФЧ-ББ, ЛФС-ББ, ЛФС-ТБ, ЛФЧ-ТБ, ЛФК-Т, ЛФК-ТТ, ЛФК-ТС, ЛМЧ-ТБ, ЛМС-ББ, ЛМЧ-ТБ, ЛМК-ТТ, ЛМК-ТС, ЛМР-СС	0,08; 0,1; 0,13; 0,14; 0,15; 0,17; 0,21	10^{10}—10^{11}	0,03—0,05	9—20	Гибкий при комнатной температуре материал, выпускаемый в роликах шириной 10, 15, 20, 25, 30 и 35 мм	20—82 руб.
Микалекс	—	4; 5; 6; 8; 10 12; 15 и более	10^{10}—10^{12}	0,002—0,04 при 10^{6} Гц	12—18	Твердый дугостойкий материал на основе молотой слюды и стекла	1—2 руб.

Таблица 13.15. **Основные свойства слюдинитовых электроизоляционных материалов**

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические параметры при 20 °С		Область применения	Цена за 1 кг
			ρ_V, Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м		
Слюдинит коллекторный	КСШ	0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1,0; 1,05; 1,1; 1,2	10^{10}—10^{11}	28—35	Электроизоляционные прокладки между пластинами в коллекторах электрических машин	16 руб.
Слюдинит гибкий	ГСП $Г_1$СП,$Г_1$СК $Г_1$СКН $Г_2$СП, $Г_2$СК $Г_2$СКН ГСП-ПЛ-10 ГСП-ПЛ-20 ГСП-ПЛ-60	0,15; 0,2; 0,25; 0,3 0,10; 0,15 0,10; 0,12; 0,15 0,20; 0,25 0,35 0,15; 0,20 0,2; 0,25 0,25; 0,3	10^{11}—10^{12}	17—26	Пазовая и межвитковая изоляция электрических машин	9—18 руб.
Стеклослюдинит формовочный нагревостойкий	ФСКН-1 ФСКН-2	0,1; 0,12 0,1; 0,12; 0,15			Пазовая изоляция и электроизоляционные прокладки длительной нагревостойкости при 300 °С	17—26 руб.
Стеклослюдинитовые пропитанные ленты	ЛСК-ТТ, ЛСК-СС ЛСЭП-934-ТПл ЛСЭП-934-СПл ЛСК-110-СПл ЛСК-110-ТПл Л ЭК-5-СПл, ЛСЭК-5-ТПл ЛСЭК-5-ТТ, ЛСЭК-5-СТ	0,15; 0,17 0,09; 0,1; 0,13 0,11; 0,13 0,08; 0,09; 0,1; 0,13; 0,15 0,13; 0,15 0,13; 0,15 0,11; 0,13; 0,15; 0,17	10^{10}—10^{11}	10—40	Гибкий при комнатной температуре материал, выпускаемый в роликах шириной 15, 20, 25, 30 и 35 мм	12—20 руб.
Стеклослюдинитовые непропитанные ленты	Выпускаются 40 марок, отличающихся толщиной, видом подложки (лавсановая, микалентная бумага, стеклоткань и др.) и покрышки	0,09; 0,11; 0,13; 0,15	10^{9}—10^{11}	10—20	Материал с повышенной гибкостью при комнатной температуре, выпускаемый в роликах шириной от 15 до 800 мм	10—30 руб.

Таблица 13.16. **Основные свойства слюдопластовых электроизоляционных материалов**

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические параметры при 20 °С		Область применения	Цена за 1 кг
			ρ_V, Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м		
Слюдопласт коллекторный	КИФШ, КИФШ-1, КИФШ-2, КИФП, КИФК, КИФН-С	0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2	10^{10}—10^{11}	22—24	Электроизоляционные прокладки между пластинами в коллекторах электрических машин	7 р. 70 к.—9 р. 80 к.
Слюдопласт прокладочный	ПИФШ, ПИВША, ПИФТ	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,5	10^{11}—10^{12}	20—26	Твердые электроизоляционные прокладки и шайбы в электрических машинах и аппаратах	6 р. 20 к.—7 р. 60 к.
Слюдопласт формовочный прессованный	ФИФК-АПЛ, ФИФ-АПЛ	0,25; 0,3; 0,35	10^{11}—10^{12}	32—55	Электроизоляционные изделия фасонного профиля, получаемые горячим прессованием	9 р. 50 к.
Слюдопласт гибкий теплостойкий	ГСФК-АФ	0,15; 0,3	10^{11}—10^{12}	18—20	Пазовая изоляция электрических машин нагревостойкого исполнения	13 р. 10 к.

Продолжение табл. 13.16

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические параметры при 20 °С		Область применения	Цена за 1 кг
			ρ_V, Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м		
Слюдопластофолий	ИФГ-Б, ИФГ-БП, ИФГ, ИФГ-П	0,15; 0,2; 0,3	10^{10}—10^{11}	22—25	Рулонный и листовой материал, формуемый в нагретом состоянии, для изоляции роторных стержней и других частей электрических машин	6 р. 80 к.—10 р. 20 к.
Слюдопластолента	ЛИФЧ-ББ, ЛИФГ-ББ	0,11; 0,13; 0,15; 0,17	10^{10}—10^{11}	18—22	Гибкий материал для витковой изоляции электрических машин до 6 кВ	7 р. 60 к.
Стеклослюдопластовая лента	ЛИПЭФ-Т	0,13	10^{10}—10^{11}	18—20	То же, но с повышенной нагревостойкостью (класс В)	12р. 40к.
Стеклослюдопластовая лента нагревостойкая	ЛИФК-Т ЛИФК-ТТ ЛИФК-ТС	0,1; 0,12 0,17; 0,19 0,15; 0,17; 0,19	10^{10}—10^{11}	12—14	То же, но с повышенной нагревостойкостью (класс Н)	17 р. 10 к.—22 р. 00 к.

13.11. ЭЛЕКТРОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 13.17. **Основные свойства изоляторных электрокерамических материалов**

Материал	Плотность, кг/м³	Механические параметры[1]			ТК[2] линейного расширения, 10^{-6} °С$^{-1}$	Электрические параметры при 20 °С			
		Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	Разрушающее напряжение при статическом изгибе, МПа	Ударная вязкость, кДж/м²		ρ_V, Ом·м	ε_r	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м
Электрофарфор	2200	30—55	60—110	1,8—2,2	(3,5—5,0)	10^{11}—10^{12}	5—8	0,022—0,025	30—32
Ультрафарфор УФ-46 и УФ-53	3200	50—60	200—250	2,5—2,8	(5,0—5,5)	10^{12}—10^{13}	8,0—8,8	0,0005—0,001	30—35
Стеатит[3] СК-4, ТК-21	3000	60—70	170—190	3,0—3,5	(6,0—6,4)	10^{13}—10^{14}	6,5—7,0	0,001—0,003	40—42
Кордиерит[4]	2800	—	70—88	2,0—3,0	(2,0—2,3)	10^{9}—10^{10}	5—6	—	4,5—6,0

[1] Приведенные значения механических характеристик относятся к неглазурованным образцам. У образцов фарфора и стеатита, покрытых глазурью, значения механических характеристик превышают приведенные в среднем на 15—20 % (при правильно подобранных глазурях).

[2] Значения ТК расширения даны для интервала температур 20—100 °С.

[3] Стеатиты по сравнению с фарфорами и кордиеритом обладают меньшей устойчивостью к резкой смене температур, т. е. менее термостойки.

[4] Кордиеритовая керамика обладает заметным водопоглощением (7—11 %), но отличается большой стойкостью к электрическим дугам и находит главное применение в электрических аппаратах.

Список литературы

13.1. **Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М.** Электротехнические материалы. Л.: Энергия, 1977. 352 с.

13.2. **Справочник** по электротехническим материалам/Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. М.: Энергия, 1974. Т. 1. 584 с. Т. 2. 616 с.

13.3. **Электротехнические** материалы (справочник)/В. Б. Березин, Н. С. Прохоров, Г. А. Рыков, А. М. Хайкин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 504 с.

13.4. **Технология** производства электроизоляционных материалов и изделий/О. В. Бобылев, Н. В. Никулин, П. В. Русаков, В. И. Цыганов. М.: Энергия, 1977. 432 с.

13.5. **Корицкий Ю. В.** Электротехнические материалы. М.: Энергия, 1976. 320 с.

13.6. **Электрорадиоматериалы**/Б. М. Тареев, Н. В. Короткова, В. М. Петров, А. А. Преображенский. М.: Высшая школа, 1978. 380 с.

13.7. **ГОСТ** 21515-76. Материалы диэлектрические. Термины и определения.

Раздел 14

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

14.1. Общие сведения 401
14.2. Получение полупроводниковых материалов 401
14.3. Основные параметры полупроводниковых материалов и методы их измерения . 401
14.4. Электрофизические параметры полупроводников 403
Список литературы 408

14.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К классу полупроводников формально относятся вещества, удельная электрическая проводимость которых может принимать значения от 10^6 до 10^{-3} См/м (при $T=300$ К). С точки зрения зонной теории вещества (см. § 3.1), в которых при $T=0$ К верхняя из заполненных электронами энергетических зон (валентная зона) и нижняя из не заполненных электронами энергетических зон (зона проводимости) не перекрываются, являются полупроводниками или диэлектриками. Граница между ними весьма условная — в полупроводниках энергетический зазор (ширина запрещенной зоны) между зоной проводимости и валентной зоной не превосходит 2—3 эВ, что приводит к появлению в зонах заметного числа свободных носителей заряда (электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне) при $T>0$ К (см. также § 3.1).

Для полупроводников характерна зависимость проводимости от внешних воздействий (температуры, электромагнитного излучения и видимого света, давления, деформации, электрических и магнитных полей, ионизирующего излучения) и от количества примесей, а также характерна нелинейность вольт-амперной характеристики контакта.

Полупроводники, как правило, являются кристаллическими веществами с различными кристаллическими решетками, причем они могут быть простыми (решетка образована из атомов одного химического элемента) или сложными (решетка образована из атомов двух или большего числа химических элементов). Сложный полупроводник может быть химическим соединением или сплавом.

Электронный полупроводник — полупроводник, электропроводность которого обусловлена в основном перемещением электронов.

Дырочный полупроводник — полупроводник, электропроводность которого обусловлена перемещением дырок проводимости.

14.2. ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Способов получения чистых и примесных полупроводниковых материалов очень много: наиболее совершенный и широко применяемый способ очистки полупроводниковых материалов — способ «зонной плавки». При зонном плавлении слиток «грязного» полупроводника, полученный тем или иным способом, помещается в чистую графитовую лодочку, заключенную в кварцевую трубу; по этой трубе непрерывно проходит инертный газ, например, аргон, который препятствует попаданию в трубу извне нежелательных примесей и воздуха. При помощи узкого кольцевого нагревателя добиваются плавления небольшой части слитка и медленно перемещают расплавленную зону вдоль него. На границе твердой и жидкой фаз большинство примесей диффундирует из твердой фазы в жидкую за счет большей растворимости в жидкой фазе и уносится расплавленной зоной к концу слитка. При повторении этого процесса несколько раз получается очень чистый слиток, у которого отламывается грязный конец. После зонной плавки слиток поступает в дальнейшую плавку, где в него вводят необходимые примеси в нужных количествах. Наиболее распространенный метод «вытягивание монокристаллов из расплава», именуемый методом Чохральского, заключается в следующем. При медленном вытягивании затравки (кусочка монокристалла данного полупроводника) из расплава, который также находится в инертном газе, расплавленный полупроводник постепенно выкристаллизовывается на ее поверхности, образуя при этом монокристалл. В процессе вытягивания кристалла из расплава для достижения однородности растущего кристалла и равномерного перемещения введенных в расплав примесей часто дают затравке и тиглю с расплавом вращательное движение в разные стороны, причем устанавливается очень точный контроль температуры расплава. После того как монокристалл вытянут из расплава, ему дают постепенно остыть, затем проверяют его электрические параметры.

14.3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Электрическая проводимость. Одним из важнейших параметров полупроводников является их удельная проводимость, характеризующая степень чистоты материала.

Проводимость полупроводников зависит от концентрации свободных носителей заряда (электронов или дырок) при данной температуре и их подвижности. В общем случае

$$\sigma = 1/\rho = e\,(n\mu_n + p\mu_p),$$

где σ — удельная проводимость при данной температуре; ρ — удельное сопротивление; n, p — концентрация свободных носителей; μ_n, μ_p — подвижности электронов и дырок при данной температуре.

В настоящее время имеется много методов измерения удельного сопротивления: двухзондовый, трехзондовый, четырехзондовый, бес-

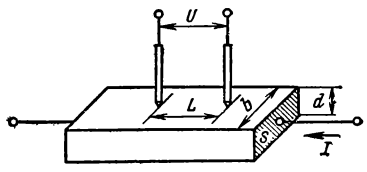


Рис. 14.1. Измерение удельного сопротивления двухзондовым методом

контактный и др. Наибольшее распространение получили двухзондовый и четырехзондовый методы.

Двухзондовый метод применяется для измерения удельного сопротивления образцов, имеющих правильную геометрическую форму с известным поперечным сечением (рис. 14.1). Через торцовые грани образца с нанесенными на них омическими контактами пропускается электрический ток. На поверхности образца вдоль линии тока располагаются два металлических зонда на расстоянии L друг от друга и измеряется разность потенциалов U между ними.

Удельное сопротивление образцов вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{US}{IL} = \frac{Udb}{IL}.$$

Для исключения падения напряжения на контактных сопротивлениях зондов разность потенциалов U измеряется либо потенциометром, либо вольтметром с большим входным сопротивлением.

Четырехзондовый метод, обладая высокими метрологическими показателями и простотой конструкции, получил наиболее широкое применение. Он позволяет измерять удельное сопротивление не только объемных монокристаллов, но и тонких диффузионных и эпитаксиальных слоев полупроводника. Принцип четырехзондового метода показан на рис. 14.2.

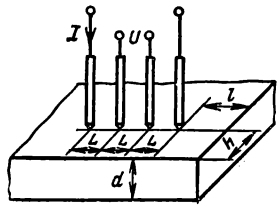


Рис. 14.2. Измерение удельного сопротивления четырехзондовым методом

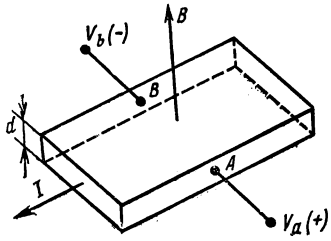


Рис. 14.3. Поперечное поле, обусловленное эффектом Холла

На поверхности полупроводника помещаются четыре зонда, расположенные на одной линии на равном расстоянии L друг от друга; через крайние зонды пропускают электрический ток I, а между двумя внутренними зондами измеряется разность потенциалов U.

Для полубесконечного образца, когда d, l, $h \gg L$, удельное сопротивление вычисляется по формуле

$$\rho = 2\pi LU/I.$$

При измерении образцов полупроводника с размерами d, l, h, соизмеримыми с межзондовым расстоянием L, вводится поправочный множитель F, который зависит от граничных условий измерения. Значения этого множителя приводятся в специальной литературе [14.1]. В этом случае удельное сопротивление

$$\rho = F \cdot 2\pi LU/I.$$

Концентрация и подвижность. Определение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках производится с помощью эффекта Холла, сущность которого в следующем. Если поместить однородный прямоугольный образец полупроводника в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока, протекающему по образцу, то на боковых гранях возникает поперечная разность потенциала, называемая ЭДС Холла (рис. 14.3),

$$V_a - V_b = RIB/d,$$

где

$$R = (V_a - V_b)\, d/IB,$$

где $V_a - V_b$ — холловская разность потенциала; R — коэффициент Холла; I — ток через образец; B — магнитная индукция; d — толщина пластинки в направлении магнитного поля (см. также § 3.1).

В общем виде коэффициент Холла определяется выражением

$$R = \frac{1}{e} \frac{-n\mu_n^2 + p\mu_p^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2} = \frac{-nb^2 + p}{(nb + p)^2 e},$$

где b — отношение подвижностей.

В частных случаях для резко выраженных типов полупроводников коэффициент Холла равен:

$$R = 1/ne \text{ или } 1/pe.$$

Эффект Холла позволяет определять тип проводимости полупроводника (по знаку возникающей между точками A и B разности потенциала), концентрацию и подвижность носителей заряда при совместном измерении проводимости образца. Для полупроводника резко выраженного типа подвижность

$$\mu = \sigma R.$$

Для определения в полупроводниках концентрации носителей заряда в лабораторной и производственной практике используется ряд методов [14.1, 14.2]: метод вольт-фарадных характеристик барьера Шоттки, метод плазменного резонанса, по оптическому поглощению, по эффекту Фарадея и др.

Концентрации донорных и акцепторных примесей, энергия их ионизации, ширина запрещенной зоны. Для характеристики относи-

тельной чистоты полупроводника вводится понятие — степень компенсации K, равная для полупроводника n-типа

$$K = N_а/N_д,$$

где $N_а$, $N_д$ — концентрации акцепторных и донорных примесей.

Концентрации могут быть определены на основе измерения температурной зависимости концентрации и подвижности свободных носителей заряда по эффекту Холла [14.1—14.3].

В соответствии с законом действующих масс зависимость концентрации электронов дырок от температуры дается следующими соотношениями:

для электронного полупроводника

$$\frac{n(N_а + n)}{N_д - N_а - n} = \frac{1}{\gamma_д} 2\left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2}\right)^{3/2} \times \exp\left(-\frac{W_д}{kT}\right) = K_д;$$

для дырочного полупроводника

$$\frac{p(N_д + p)}{N_а - N_д - p} = \frac{1}{\gamma_а} 2\left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2}\right)^{3/2} \times \exp\left(-\frac{W_а}{kT}\right) = K_а,$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $K_д$, $K_а$ — константы равновесия; $\gamma_д$, $\gamma_а$ — факторы вырождения донорного и акцепторного уровней; $W_д$, $W_а$ — энергии активации донорной и акцепторной примеси.

Экспериментально полученные зависимости концентраций n и p от температуры сопоставляются с последними соотношениями. С помощью ЭВМ подбором параметров $\gamma_а$, $\gamma_д$, $N_а$, $N_д$, $W_а$, $W_д$ добиваются наилучшего соответствия теоретической и экспериментальной кривых.

Исследуя температурную зависимость концентрации в области собственной проводимости, можно определить ширину запрещенной зоны ΔW (см. § 3.1).

Время жизни. При расчете и конструировании различных полупроводниковых приборов используется параметр «время жизни» неосновных носителей заряда τ или диффузионная длина L_D, которые связаны между собой соотношением $L_D = \sqrt{D\tau}$, где D — коэффициент диффузии и подвижность связаны соотношением Эйнштейна $D = kT\mu/e$ (в невырожденном полупроводнике).

Наиболее распространенный метод — измерение времени жизни носителей заряда по изменению фотопроводимости кристалла во времени после прекращения действия света на полупроводник из следующего соотношения: $\sigma_ф = \sigma_0 e^{-t/\tau}$, где σ_0 — удельная проводимость проводника в темноте; $\sigma_ф$ — удельная проводимость полупроводника после прекращения освещения; t — время; τ — время жизни неосновных носителей заряда.

Кроме этого метода существует большое количество других методов определения диффузионной длины L_D и времени жизни неосновных носителей заряда, описанных в соответствующей литературе.

Поверхностная рекомбинация. Помимо рекомбинаций в объеме носители могут рекомбинировать на поверхности полупроводника. Скорость поверхностной рекомбинации s определяется как скорость потока частиц из объема к поверхности, необходимого для поддержания на ней избыточного числа неравновесных носителей заряда. Значение s сильно зависит от способа и качества обработки поверхности кристалла. Например, для германия она колеблется от 0,1 до 10^4 м/с.

Структура зон и эффективные массы. Эффективная масса носителя m характеризует его движение в кристаллической решетке. Обратная эффективная масса $(m^*)^{-1}$ — тензорная величина, определяемая зависимостью энергии носителя W от его волнового вектора k:

$$\left(m^*_{ij}\right)^{-1} = \frac{1}{\hbar^2}\left[\frac{\partial^2 W(k)}{\partial k_i\, \partial k_j}\right].$$

Прямым методом определения $W(k)$ и эффективных масс является циклотронный резонанс. Ценные сведения о зонной структуре и эффективных массах дают измерения анизотропии магнитосопротивления, магнитооптических эффектов.

Качественные строения зон наиболее распространенных полупроводников приведены на рис. 14.4—14.8.

14.4. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Кремний и германий. Кремний и германий — наиболее изученные и широко используемые полупроводниковые материалы (табл. 14.1—14.3). Они относятся к IV группе таблицы Менделеева. Кристаллизуются в решетке типа алмаза. Имеют сложную зонную структуру (см. рис. 14.4, 14.5). В кремнии имеется шесть эквивалентных минимумов зоны проводимости, расположенных на осях [100] внутри зоны Брюллюэна, а в германии — восемь ми-

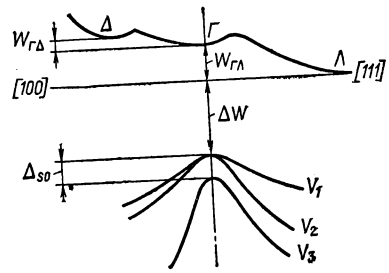


Рис. 14.4. Зонная структура германия

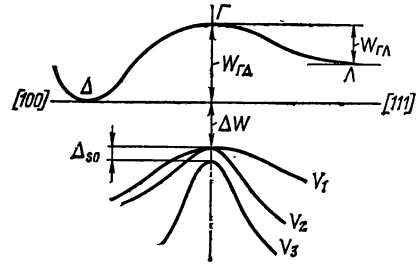


Рис. 14.5. Зонная структура кремния

Таблица 14.1. **Электрофизические параметры чистых германия и кремния**

Параметры	Численное значение	
	Германий	Кремний
Кристаллическая структура, тип	Кубическая O_h^7	Кубическая O_h^7
Постоянная решетки a, мм	0,565754±0,0000001 (300 К)	0,543072±0,0000001 (300 К)
Плотность ρ, кг/м³	5322,4±2,5 (300 К)	2328,3±0,3 (300 К)
Температура плавления $T_{пл}$, К	1210±0,5	1690±4
Теплота плавления $\lambda_{пл}$, 10^4 Дж/кмоль	3290±90	5000±80
Теплота испарения $\lambda_{исп}$, 10^4 Дж/кмоль	37 190±900	4400±500
Удельная теплоемкость, c, Дж/(кг·°С)	2,5·10⁴ (300 К) 1,11·10⁴ (80 К)	4,65·10⁴ (300 К) 1,24·10⁴ (80 К)
Теплопроводность λ, Вт/(м·°С)	0,7 (300 К) 1,0 (200 К) 5,5 (50 К) 11 (20 К) 10 (10 К)	1,3 (300 К) 2,5 (200 К) 13 (50 К) 17 (20 К) 0,8 (2 К)
Температура Дебая $T_д$, К	353 (80 К) 406 (300 К)	539 (80 К) 689 (300 К)
Температурный коэффициент линейного расширения α, 10^{-6} °С	+0,07 (40 К) +1,05 (80 К) +2,20 (100 К) +5,75 (300 К)	—0,05 (40 К) —0,77 (80 К) —0,31 (100 К) —2,33 (300 К)
Относительная магнитная проницаемость μ_r	$-0{,}1050\cdot10^{-6}$ (293 К)	$-0{,}111\cdot10^{-6}$ (293 К)
Относительная диэлектрическая проницаемость ε_r	16,3±0,2 (290 К) 15,3±0,2 (77 К и 1 МГц)	11,7±0,2 (290 К) 13,7 (при 24 000 Гц)
Коэффициент упругости, 10^{10} Па:		
k_{11}	12,88 (293 К) 13,16 (78 К)	16,56 (293 К), 16,75 (78 К)
k_{12}	4,83 (293 К), 4,94 (78 К)	6,39 (293 К), 6,50 (78 К)
k_{44}	6,71 (293 К), 6,84 (78 К)	7,95 (293 К), 8,00 (78 К)
Показатель преломления n	4,01 (300 К и λ=0,589 мкм)	3,42 (300 К и λ=0,589 мкм)
Работа выхода A, 10^{-19} Дж	7,52±0,16	7,68±0,16
Ширина запрещенной зоны ΔW_0, эВ:	0,774 (0 К)	1,15 (0 К)
$W_{г\Delta}$	0,05	2,3
$W_{г\Delta}$	0,15	—
$W_{гл}$	0,02	1,5
Δ_{SO}	0,28	0,035
Δ_{SO}	0,30	0,044
Температурное изменение ширины запрещенной зоны $d\Delta W_0/dT$, эВ/К	$-4\cdot10^{-4}$	$-4\cdot10^{-4}$
Изменение ширины запрещенной зоны от давления $d\Delta W_0/dp=10^{-10}$ эВ/Па	0,5	—0,15
Эффективная масса m^*/m_0:		
электронов $m_{\parallel}$	1,583	0,1905
$m_{\perp}$	0,0815	0,1905
дырок m_{p1}	0,34	0,52
m_{p2}	0,043	0,16
m_{p3}	0,08	0,25
Эффективная масса электропроводности:		
электронов $m_{n\sigma}$	0,12	0,26
дырок $m_{p\sigma}$	0,25	0,38
Эффективная масса плотности состояний:		
электронов m_{dn}	0,57	1,08
дырок m_{dp}	0,37	0,59
Зонные параметры валентной зоны:		
A	—13,27	—4,28
B	—8,62	—0,75
C	12,4	5,25
Дрейфовая подвижность, 10^{-4} м²/(В·с):		
электронов	$3800\ (T/300)^{-1,66}$	$1300\ (T/900)^{-2,6}$
дырок	$1920\ (T/300)^{-2,33}$	$500\ (T/900)^{-2,3}$
Пьезорезистивный коэффициент, 10^{-11} м²/Н:	*n*-тип / *p*-тип	*n*-тип / *p*-тип
π_{46}	—138 / +97,5	—13,6 / +138
π_{11}	—2,3 / —3,7	—102 / 46,6
π_{12}	—3,2 / +3,2	+53,5 / —11

Таблица 14.2. **Свойства примесей в кремнии**

Примесь	Тип: донор (Д), акцептор (А)	Энергия ионизации*, эВ	Примесь	Тип: донор (Д), акцептор (А)	Энергия ионизации*, эВ
Al	А	0,057	In	А	0,16
As	Д	0,049	Li	Д	0,033
Au	A_1	0,35	O	$Д_1$	0,03
	A_2	0,67		$Д_2$	0,06
B	А	0,046	P	Д	0,044
Bi	Д	0,069	S	$Д_1$	0,18
Cu	A_1	0,24		$Д_2$	0,37
	A_2	0,72	Sb	Д	0,039
Fe	A_1	0,4	Te	А	0,26
	A_2	0,066	Zn	A_1	0,31
Ga	А	0,065		A_2	0,66

* Для доноров энергия ионизации отсчитывается от дна зоны проводимости, для акцепторов—от края валентной зоны.

Таблица 14.3. **Свойства примесей в германии**

Примесь	Тип: донор (Д), акцептор (А)	Энергия ионизации*, эВ	Примесь	Тип: донор (Д), акцептор (А)	Энергия ионизации*, эВ
Al	А	0,0102	Li	Д	0,093
Ag	А	0,13; 0,5; 0,7	Mn	А	0,16; 0,42
As	Д	0,0127	Ni	Д	0,22; 0,49
Au	А	0,16; 0,59; 0,75	O	Д	0,01
B	А	0,0104	P	Д	0,012
Be	А	0,07	Pt	А	0,04; 0,20; 0,67
Bi	Д	0,012	S	Д	0,18
Cd	А	0,05; 0,15	Sb	Д	0,0096
Co	А	0,09; 0,25; 0,48	Se	Д	0,014; 0,28
Cu	А	0,4; 0,33; 0,53	Te	Д	0,11; 0,30
Fe	А	0,35; 0,52	Tl	А	0,01
Ga	А	0,0108	Zn	А	0,03; 0,09
In	А	0,0112			

* Для доноров энергия ионизации отсчитывается от дна зоны проводимости, для акцепторов — от края валентной зоны.

нимумов на осях [111], расположенных по краю зоны Бриллюэна. Вблизи этих минимумов изоэнергетические поверхности имеют вид эллипсоидов вращения с тензорной эффективной массой. Уравнение эллипсоида вращения для этих поверхностей имеет вид:

$$W(k) = \frac{\hbar^2}{2}\left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{m_\perp^*} + \frac{k_z^2}{m_\parallel^*}\right),$$

где $m_\parallel^*$ и $m_\perp^*$ — продольная и поперечная эффективные массы.

Большие полуоси эллипсоидов расположены в кремнии вдоль направлений [100], а в германии — вдоль [111]. В Si шесть эквивалентных эллипсоидов вращения, а в Ge — четыре полных эквивалентных эллипсоида (или восемь половинок эллипсоидов).

В кремнии и германии валентные зоны расщеплены на три подзоны V_1, V_2, V_3, две из которых вырождены в точке $k=0$, а третья расщеплена спин-орбитальным взаимодействием на величину Δ_{so}. Зона V_1 называется зоной тяжелых дырок, а зона V_2 — легких дырок. Связь между энергией в первых двух подзонах $W_{1,2}$ с волновым вектором описывается уравнением вида

$$W_{1,2}(k) = W_0 - \frac{\hbar^2}{2m_0}\left[Ak^2 \pm \right.$$
$$\left. \pm \sqrt{B^2 k^4 + C^2\left(k_x^2 k_y^2 + k_y^2 k_z^2 + k_z^2 k_x^2\right)}\right],$$

где W_0 — значение W при $k=0$; A, B, C — безразмерные коэффициенты; m_0 — масса свободного электрона. В сферической системе координат выражение $W_{1,2}(k)$ можно представить в виде

$$W_{1,2}(k) = W_0 - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0}\left[A \pm \right.$$
$$\left. \pm \sqrt{B^2 + C^2 \sin^2\theta\,(\sin^2\varphi\cos^2\varphi\sin^2\theta + \cos^2\theta)}\right].$$

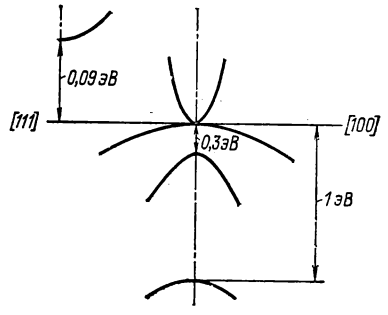


Рис. 14.6. Зонная структура α Sn

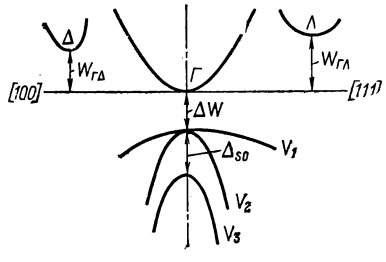


Рис. 14.7. Зонная структура GaP, AlSb, AlAs

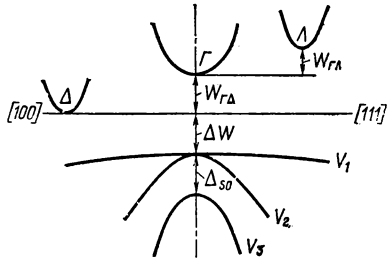


Рис. 14.8. Зонная структура InSb, InAs, InP, GaAs, GaSb

Таблица 14.4. Электрические свойства простых полупроводников

Элемент	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, нм	ρ, кг/м³	$T_{пл}$, К	T_D, К	λ, Вт/(м·°С)	ε_r	ΔW_0, эВ	$\frac{d\Delta W}{dT}$, 10^{-4} эВ/°С	$\frac{d\Delta W}{dp}$, 10^{-6} эВ/Па	m_n^*/m_0	m_p^*/m_0	μ_n, 10^{-4} м²/(В×с)	μ_p, 10^{-4} м²/(В·с)
B	Тетрагональная	$a = 0{,}873$, $c = 0{,}503$	2330	2300	—	—	12	1,16	—8,5	—	—	0,7	1	50
C (алмаз)	Кубическая	$a = 0{,}8566$	3510	4300	2240	550	—	5,4	—1,2	$<10^{-8}$	—	2,35 2,1	1800 $(\sim T^{-3/2})$	1400 $(\sim T^{-3/2})$
P (черный)	Орторомбическая	$a = 0{,}331$, $b = 0{,}438$, $c = 1{,}05$	2690	317	—	—	—	0,33	2,3	—	—	—	220 $(\sim T^{-3/2})$	350 $(\sim T^{-3/2})$
As (серый)	Тригональная	$a = 0{,}375$, $c = 1{,}052$	5730	1090	224	—	—	1,2	—5	—	$m_1 = 0{,}121$, $m_2 = 0{,}138$, $m_3 = 1{,}18$	$m_1 = 0{,}122$, $m_2 = 0{,}0805$, $m_3 = 1{,}04$	65	65
Se	Тригональная	$a = 0{,}436$, $c = 0{,}496$	4800	490	1200	—	—	2,85 2,0	—9 —23,8	—13	—	0,96	—	20 40—240
α-Sn	Кубическая	$a = 0{,}646$	5770	505	230	67	—	0 (см. рис. 10.7)	—35 0	0	0,024 (в минимуме <11°>)	$m_d = 0{,}26$	2500 10^5 (78 К) 10^6 (4,2 К)	2400
Te	Тригональная	$a = 0{,}446$, $b = 0{,}593$	6230	723	140	—	—	0,32	—1,9	—13 —16 —20	— $m_\perp = 0{,}037$, $m_\parallel = 0{,}059$	$m_\perp = 1{,}11$, $m_\parallel = 0{,}264$, $m_d = 0{,}4$	1700	1200
Sb	Тригональная	$a = 0{,}449$, $c = 1{,}125$	6700	903,5	204	40 (100 К)	—	0,13	—	—	—	—	—	—
I	Орторомбическая	$a = 0{,}477$, $b = 0{,}725$, $c = 0{,}977$	4940	387	—	—	10,3	1,3	—	—	—	—	25	—

Таблица 14.5. Электрофизические свойства полупроводниковых соединений $A^{III}B^{V}$ с кубической структурой

Соединение	Постоянная решетки a, нм	ρ, кг/м²	$T_{пл}$, К	T_D, К	λ, 10^2 Вт/(м·°С)	ε_r
AlP	0,542	2850	1770	583	0,92	9,83
AlAs	0,562	3600	1870	417	0,84	11
AlSb	0,610	4150	1327	292	0,59	11,5
GaP	0,544	4400	1623	446	0,75	10,12
GaAs	0,569	5400	1510	344	0,46	12,53
						12,9
GaSb	0,609	5650	985	265	0,34	15
						16,1
InP	0,586	4790	1327	321	0,67	14
						12,4
InAs	0,606	5680	1216	249	0,27	14,5
						14,9
InSb	0,648	5780	798	262	0,17	17
						17,7

Продолжение табл. 14.5

Соединение	ΔW, эВ	$\frac{d\Delta W}{dT}$, 10^{-4} эВ/°С	$\frac{d\Delta W}{dp}$, 10^{-6} эВ/Па	$W_{\Gamma\Delta}$, эВ	$W_{\Gamma\Lambda}$, эВ	Δ_{SO}, эВ	$\frac{m_n^{(000)}}{m_0}$
AlP	3,0	—	—	—	—	0,05	—
AlAs	2,2	—	—	1,3	—	0,29	—
AlSb	1,9	—3,5 (0 К)	—	0,7			
	1,6	—4,5 (78—300 К)	—1,6 [100]	0,29	—	0,75	0,09
GaP	2,34	—5,5	—1,7 [100]	0,35	0,25	0,1	0,12
	2,3						
GaAs	1,52	—5	—12,5 [100]	0,36	0,5	0,33	0,067
			—8,7 [100]				
GaSb	0,813	—3,5	12 [000]				
		—4,1	—10 [100]	0,4	0,07	0,8	0,047
			7,3 [111]				
InP	1,416	—4,6	4,6	0,7	0,4	0,1	0,082
	1,4	—2,9					
		—2,2	4,8 [000]			0,43	
IAs	0,425	—3,7	8,5 [000]			0,38	0,023
			3,2 [111]				
InSb	—2,8	—2,8	15,5 [000]			0,98	0,014
		—2,9	14,2 [000]		0,45—0,5	0,803	

Продолжение табл. 14.5

Соединение	$\frac{m_p^{(000)}}{m_0}$	$\frac{m_{p1}}{m_0}$	$\frac{m_{p2}}{m_0}$	$\frac{m_{dp}}{m_0}$	μ_n, 10^{-4} м²/(В·с)	μ_p, 10^{-4} м²/(В·с)
AlP	—	—	0,29	—	50	150
AlAs	—	—	0,22	—	1200	—
	0,39	0,4	0,12	0,9	200	420 (300 К)
AlSb	0,25		0,137			3700 (77 К)
GaP	0,14	0,5	0,13	—	300	75
	0,35	0,56	0,18		(300 К)	(300 К)
	0,22				500	420
	1,15				(77 К)	(77 К)
GaAs	1,2	0,5	0,89	0,5	$8{,}5\cdot10^3$	420
		0,475	0,089		(200 К)	(300 К)
			0,091		$2{,}1\cdot10^4$	4200
					(77 К)	(77 К)
GaSb	—	0,23	0,06	0,39	4000	1400
		0,36	0,052		(300 К)	(300 К)
		0,26			6000	3600
					(77 К)	(77 К)
InP	—	0,2	0,086	—	$4{,}6\cdot10^3$	150
		0,60	0,12		(300 К)	(300 К)
					$2{,}4\cdot10^4$	1200
					(77 К)	(77 К)
InAs	—	0,4	0,025	0,38	$3{,}3\cdot10^4$	460
					(300 К)	(300 К)
					8,2	690
					(77 К)	(77 К)
InSb	—	0,04	0,015	0,2	$7{,}8\cdot10^4$	750
			0,0202		(300 К)	(300 К)
					$1{,}2\cdot10^5$	10^4
					(77 К)	(77 К)

Отсюда следует, что изоэнергетические поверхности представляют собой деформированные сферы. Если это выражение усреднить по углам, то можно записать

$$W_{0,2}(k) = W_0 - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0}\left[A \pm \sqrt{B^2 + C^2/5}\right],$$

т. е. деформированные поверхности равной энергии заменяются некоторой «средней» сферической поверхностью. В этом случае эффективную массу можно считать скалярной величиной:

$$m^*_{p1,2} = \frac{m_0}{A \pm \sqrt{B^2 + C^2/5}}.$$

Следовательно, существуют два вида дырок: $m^*_{p1} > m^*_{p2}$ — тяжелые и легкие дырки.

Для третьей подзоны $W(k)$ имеет вид:

$$W_3(k) = W_0 - \Delta_{SO} - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} A,$$

т. е. эффективная масса в третьей подзоне является скалярной величиной, равной

$$m^*_{p3} = m_0/A.$$

Для анализа различных экспериментальных данных часто пользуются скалярной величиной эффективной массы плотности состояний (m^*_{dp} и m^*_{dn} для дырок и электронов соответственно), которая в случае эллипсоидальных поверхностей равной энергии находится из соотношения

$$m^*_{dn} = N^{2/3}\left[m^*_{\parallel}\left(m^*_{\perp}\right)^2\right]^{1/3},$$

где N — число эквивалентных минимумов (шесть минимумов для кремния и четыре для германия).

Для дырок в валентной зоне m^*_{dp} будет определяться из соотношения

$$m^*_{dp} = \left[\left(m^*_{p1}\right)^{3/2} + \left(m^*_{p2}\right)^{3/2} + \left(m^*_{p3}\right)^{3/2}\right]^{2/3}.$$

При расчетах вводятся, кроме того, понятия омической эффективной массы m^*_{σ} и циклотронной эффективной массы m^*_c. Общие выражения для них приведены в [24.2].

Концентрация свободных носителей и их подвижность определяются по эффекту Холла и удельной проводимости.

На рис. 14.9 приведены зависимости удельной электрической проводимости германия и кремния от концентрации примесей и температуры.

Для практических расчетов можно использовать следующие выражения дрейфовых подвижностей электронов и дырок:

для германия:

$\mu_n = 4{,}90 \cdot 10^3\, T^{-1{,}66}$ при 100 К $< T <$ 280 К;

$\mu_p = 1{,}05 \cdot 10^5\, T^{-2{,}33}$ при 100 К $< T <$ 290 К;

для кремния:

$\mu_n = 4{,}0 \cdot 10^5\, T^{-2{,}6}$ при 300 К $< T <$ 400 К;

$\mu_p = 2{,}5 \cdot 10^4\, T^{-2{,}3}$ при 150 К $< T <$ 400 К.

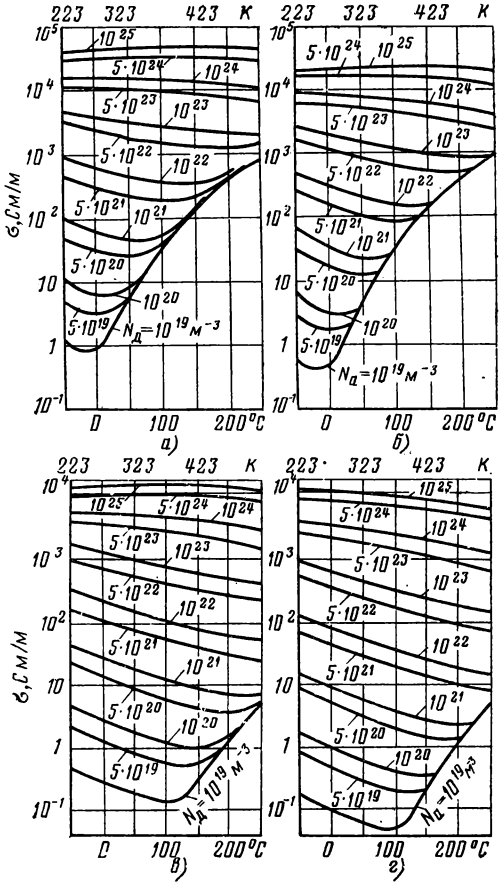


Рис. 14.9. Зависимости удельной электрической проводимости германия и кремния:

а — германий *n*-типа; *б* — германий *p*-типа; *в* — кремний *n*-типа; *г* — кремний *p*-типа

Параметры некоторых простых и двойных соединений приведены в табл. 14.4 и 14.5. Параметры многих двойных и тройных соединений, обладающих полупроводниковыми свойствами, приведены в [14.4—14.8].

Список литературы

14.1. **Батавин В. В.** Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпигаксиальных слоев. М.: Советское радио, 1976. 104 с.

14.2. **Цидильковский И. М.** Электроны и дырки в полупроводниках. М.: Наука, 1972. 640 с.

14.3. **Киреев П. С.** Физика полупроводников. М.: Высшая школа, 1977. 590 с.

14.4. **Таблицы** физических величин. Справочник под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.

14.5. **Полупроводники** $A^2B^4C_2^5$/Под ред. Н. А. Горюновой. Ю. А. Валова. М.: Советское радио, 1974. 374 с.

14.6. **Полупроводники** с узкой запрещенной зоной и их применение. М.: Мир, 1969. 255 с.

14.7. **Бергер Л. И., Прочухан В. Д.** Тройные алмазоподобные полупроводники. М.: Металлургия, 1968. 152 с.

14.8. **Маделунг О.** Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп/Пер. с англ.; Под ред. Б. И. Болтакса. М.: Мир, 1967. 478 с.

14.9. **Полупроводниковые** соединения $A^{III}B^{V}$/Пер. с англ. М.: Металлургия, 1967. 728 с.

Раздел 15

ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

15.1. Общие сведения 409
15.2. Медь 410
15.3. Латуни 412
15.4. Проводниковые бронзы 416
15.5. Алюминий 419
15.6. Алюминиевые сплавы 422
15.7. Сплавы высокого электрического сопротивления для электроизмерительных приборов 423
15.8. Жаростойкие сплавы высокого электрического сопротивления 427
15.9. Сверхпроводниковые и криопроводниковые материалы 430
15.10. Контактные материалы и электрощетки 432
15.11. Цены 439
Список литературы 439

15.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Проводниковые материалы применяются для изготовления токопроводящих элементов электроустановок. Наибольшее распространение получили такие твердые проводниковые материалы, как металлы и их сплавы, а также электроугольные изделия.

Удельное электрическое сопротивление проводников ρ принято выражать в системе СИ в мкОм·м. Удельная проводимость $\gamma = 1/\rho$ в этом случае выражается в МСм/м. Так называемая стандартная медь, по отношению к удельной проводимости которой выражают в процентах проводимость других проводниковых материалов, имеет в отожженном состоянии $\gamma = 58$ МСм/м, чему соответствует $\rho = 0{,}017241$ мкОм·м. На практике для измерения удельного сопротивления проводниковых материалов часто применялась внесистемная единица Ом·мм²/м, так как при расчете сопротивления токопроводящего элемента его длину удобно выражать в метрах, а площадь поперечного сечения — в квадратных миллиметрах, причем 1 Ом·мм²/м = 1 мкОм·м.

Высокая проводимость металлических проводников обусловлена значительной концентрацией свободных электронов. Удельные сопротивления этих материалов при нормальной температуре лежат в сравнительно узком диапазоне (10^{-2}—10 мкОм·м), и разница определяется главным образом различием подвижности электронов проводимости.

Удельное сопротивление металлов связано преимущественно с рассеянием свободных электронов на тепловых колебаниях атомов и дефектах кристаллической решетки (примесные атомы, вакансии, дислокации и др.):

$$\rho = \rho_{\text{тепл}} + \rho_{\text{ост}}.$$

При температурах, превышающих температуру Дебая Θ (для металлов $\Theta = 100 \div 500$ К), удельное сопротивление обусловлено главным образом тепловыми колебаниями решетки (сопротивлением $\rho_{\text{тепл}}$) и возрастает практически линейно (рис. 15.1). При низких (криогенных) температурах ρ практически перестает зависеть от температуры и определяется остаточным сопротивлением $\rho_{\text{ост}}$, являющимся количественной мерой концентрации дефектов кристаллической решетки. В проводниковых металлах высокой проводимости, имеющих при нормальной температуре удельное сопротивление не более 0,1 мкОм·м, содержание примесей ограничивается десятыми, сотыми и даже тысячными долями процента с целью снижения их удельного сопротивления за счет $\rho_{\text{ост}}$. Особо чистые металлы с малым значением $\rho_{\text{ост}}$ применяются в качестве криопроводниковых материалов, предназначенных для работы при температурах 70—100 К и ниже.

Для изготовления реостатов, резисторов, электронагревательных элементов применяются не металлы, а сплавы высокого электрического сопротивления (их удельное сопротивление при нормальной температуре не менее 0,3 мкОм·м), обладающие повышенным значением $\rho_{\text{ост}}$ вследствие нарушения правильности структуры решетки. Особенно заметно увеличение удельного сопротивления у сплавов, являющихся твердыми растворами.

У твердых (твердотянутых) металлов и сплавов, подвергнутых холодной протяжке, волочению, удельное сопротивление в результате искажения кристаллической решетки повышается. Мягкие (отожженные) металлы и сплавы вследствие рекристаллизации восстанавливают искаженную при пластической деформации структуру, и их удельное сопротивление уменьшается.

Изменение сопротивления проводника с температурой характеризуется температурным коэффициентом удельного сопротивления ТК ρ:

$$\text{ТК}\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho_T}\frac{d\rho}{dT},$$

имеющим размерность, обратную размерности температуры (°С$^{-1}$). Коэффициент α_ρ характеризует свойства материала при фиксированной температуре T, которой соответствуют значения удельного сопротивления ρ_T и производной $d\rho/dT$. В таблицах часто приводится значение α_ρ при 20 °С. Для расчетов удоб-

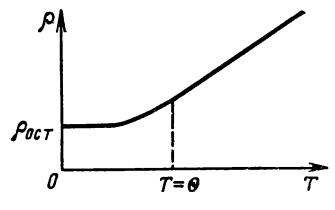


Рис. 15.1. Типичная зависимость удельного электрического сопротивления металла от температуры

но пользоваться средним температурным коэффициентом удельного сопротивления

$$\alpha_{ср} = \frac{1}{\rho_0}\frac{\rho_1 - \rho_0}{T_1 - T_0},$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при температуре T_0, принятой за начальную, а ρ_1 — при температуре T_1. Пользуясь коэффициентом $\alpha_{ср}$, определенным для интервала температур T_0—T_1, можно достаточно точно найти значение ρ_2 для любой температуры T_2 внутри этого интервала:

$$\rho_2 = \rho_0 [1 + \alpha_{ср} (T_2 - T_0)].$$

Поскольку зависимость $\rho(T)$ для проводников не является строго прямолинейной даже при температурах выше Θ, результат будет тем точнее, чем уже был взят интервал температур T_1—T_0 при определении $\alpha_{ср}$.

Металлы имеют большой температурный коэффициент удельного сопротивления (у большинства $4 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1} и более), так что их сопротивление с температурой изменяется очень заметно. У сплавов значение α_ρ обычно значительно меньше (10^{-4}—10^{-6} °C^{-1}). Сплавы с $\alpha_\rho = 10^{-5} \div 10^{-6}$ °C^{-1} можно считать материалами, практически не изменяющими сопротивления в широком диапазоне температур.

При соприкосновении двух металлических проводников на границе между ними возникает контактная разность потенциалов, которая обусловлена различием работы выхода электронов из разных металлов и неодинаковой концентрацией этих частиц. Если электрическая цепь из двух проводников имеет два спая, один из которых имеет температуру T_1, а другой — температуру T_2, то между спаями возникает термо-ЭДС

$$U = C (T_1 - T_2),$$

где C — характеризующая данную пару удельная термо-ЭДС, измеряемая в мкВ/°С.

Для термопар применяют материалы, имеющие большую удельную термо-ЭДС. В электроизмерительной технике применяют проводниковые материалы с минимальной удельной термо-ЭДС в паре с медью, чтобы паразитные термо-ЭДС не искажали результатов измерений.

Среди тепловых характеристик проводниковых материалов основными являются удельная теплоемкость, удельная теплопроводность и температурный коэффициент линейного расширения.

Механические свойства оцениваются обычно пределом прочности при растяжении $\sigma_р$, относительным удлинением при разрыве $\Delta l/l_0$ и твердостью. $\sigma_р$ проводников выражают в системе СИ в МПа, а прежде эту характеристику оценивали в кгс/мм^2, причем 1 кгс/мм^2 = = 9,8 МПа. Относительное удлинение принято определять в процентах. Твердость металлов и сплавов оценивается числом Бринелля, приводимым без указания единицы.

Твердотянутые металлы и сплавы прочнее и тверже отожженных, но зато последние пластичнее (их удлинение при разрыве во много раз больше). Сплавы более прочны, тверды и упруги по сравнению с чистыми металлами.

15.2. МЕДЬ

Удачное сочетание технически ценных свойств позволяет считать медь важнейшим металлом высокой проводимости, так как у нее:

1) минимальное удельное сопротивление (только серебро имеет ρ примерно на 5 % меньше, чем чистая медь);

2) достаточно высокая для большинства случаев практического применения механическая прочность;

3) удовлетворительная стойкость к воздействию окружающей атмосферы;

4) хорошая технологичность: благодаря сочетанию прочности и пластичности медь перерабатывается в листы, ленты, шины, профили для коллекторов электрических машин, проволоку и другие изделия;

5) относительная легкость пайки и сварки, что важно, в частности, при монтажных работах.

Существенным недостатком меди является дефицитность, обусловленная малой распространенностью в природе. В земной коре меди содержится лишь $4{,}7 \cdot 10^{-3}$% (мас.), причем в верхней части — только $2 \cdot 10^{-3}$ %. В связи с развитием промышленности, несмотря на рост производства меди, вопрос замены ее в подходящих случаях другими проводниковыми материалами, главным образом алюминием, не утратит своей актуальности и в будущем.

Общие физические свойства меди

Атомный номер	29
Атомная масса	63, 54
Изотопы	63 и 65
Валентность	1 и 2
Плотность стандартной меди при 20 °С, кг/м^3	8890

Электрические свойства меди

Удельное сопротивление чистой меди при 20 °С, мкОм·м	0,0168
Удельная проводимость чистой меди при 20 °С, МСм/м	59,5
Удельное сопротивление отожженной стандартной меди при 20 °С, мкОм·м	0,017241
Удельная проводимость отожженной стандартной меди при 20 °С, МСм/м	58
Температурный коэффициент удельного сопротивления (0—150 °С), °С$^{-1}$	0,0043
Отношение сопротивления расплавленной меди к сопротивлению твердой меди (при температуре плавления)	2,07
Работа выхода электронов, эВ	4,35
Термо-ЭДС в паре с платиной (0—100 °С), мВ	0,76

Удельное сопротивление ρ является наименьшим у чистой меди. Примеси снижают удельную проводимость меди. Согласно ГОСТ 859-78 поставляемая промышленностью медь разделяется по химическому составу на раз-

личные марки. Так как примеси оказывают неблагоприятное влияние на электропроводность, в качестве проводниковой используется медь с суммарным содержанием примесей не более 0,1 % (серебро засчитывается при этом в содержание меди). Эти марки меди, поставляемые в виде слитков и полуфабрикатов, и их химический состав приведены в табл. 15.1.

Медь марок М1 и М1р, предназначенная для электротехнических целей, дополнительно обозначается буквой Е.

Для марок меди, приведенных в табл. 15.1, ГОСТ 859-78 нормирует значения ρ и γ: для полуфабрикатов из меди марок М0б, М1б и М1, предназначенных для электротехнических целей, ρ отожженной проволоки при 20 °С не должно превышать 0,01724 мкОм·м (т. е. γ должна быть не менее 58 МСм/м); для полуфабрикатов из меди марок М1р и М1, предназначенных для отдельных видов продукции, в которых допускается повышенное сопротивление, ρ не должно превышать 0,01754 мкОм·м (γ должна быть не менее 57 МСм/м); для полуфабрикатов из меди марок М00б и М1у ρ не должно превышать 0,01706 мкОм·м (γ должна быть не менее 58,6 МСм/м).

После холодной обработки удельное сопротивление меди увеличивается на 1—3 % и больше.

Примеси отрицательно влияют также на механические и технологические свойства меди. Вреднейшими примесями являются висмут и свинец. Эти элементы почти не растворимы в меди и образуют легкоплавкую эвтектику, расположенную вокруг зерен меди. Тысячные доли процента висмута и сотые доли процента свинца делают медь красноломкой: при обработке давлением при 850—1150 °С металл растрескивается. Примесь серы делает медь хрупкой на холоде, что снижает ее пластичность. Поэтому в марках меди для электротехнической промышленности содержание серы особо ограничивается: в марке М1у — не более 0,003 %, в марке М0б для эмальпроводов — не более 0,002 %. Нежелательной примесью является кислород. Наименьшее его количество содержится в марках бескислородной меди (0,001—0,003 %). Медь изготовляется в соответствии с ГОСТ 193-79 в слитках. В зависимости от способа отливки, обработки и формы слитки выпускаются следующих видов: СВ—вертикальной непрерывной отливки; СН—горизонтальной отливки с неудаленным слоем верхней поверхности; СС — горизонтальной отливки с удаленным (состроганным) верхним слоем; СП — горизонтальной отливки, плоские, с неудаленным верхним слоем. Медные слитки изготовляются: вида СВ из марок М00б, М0б и М1б, видов СН, СС и СП — из марок М1 и М1у. На границах зерен меди в слитках образуется пленка эвтектики Cu—Cu_2O, снижающая пластичность и затрудняющая переработку меди холодной протяжкой и волочением. Водород и другие горючие газы (метан, окись углерода), действуя при высокой температуре на заготовку, содержащую Cu_2O, восстанавливают закись меди до металла с образованием водяного пара и углекислого газа, которые не растворяются в меди и выделяются из нее, вызывая растрескивание и резкое ухудшение механических свойств (водородная болезнь) Таким образом, бескислородная медь обладает не только особо высокой удельной проводимостью, пластичностью (тягучестью) и стойкостью к кратковременным воздействиям повышенных температур, но и может отжигаться в среде водорода.

В обычных атмосферных условиях медь довольно устойчива против коррозии, ибо химическая активность ее невелика. При 20 °С в сухом воздухе медь не окисляется, практически не окисляется во влажном воздухе и в пресной воде, однако в соленой воде медленно корродирует. В присутствии влаги и углекислого газа на поверхности меди образуется зеленая пленка основного карбоната. При нагревании на воздухе идет поверхностное окисление с образованием защитной пленки окиси меди CuO, весьма медленное при температурах до 200 °С; интенсивное окисление меди начинается при температурах выше 225 °С. С холодными и теплыми серной и соляной кислотами при концентрации ниже 80 % медь практически не реагирует. Растворимость водоро-

Таблица 15.1. **Марки и химический состав проводниковой меди (ГОСТ 859-78)**

Марка	Cu+Ag, %, не менее	Примеси, %, не более											Характеристика способа изготовления меди
		Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	O	Zn	P	
М00б	99,99	0,0005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,0005	Бескислородная
М0б	99,97	0,001	0,002	0,002	0,004	0,002	0,003	0,002	0,003	0,001	0,003	0,002	
М1б	99,95	0,001	0,002	0,002	0,004	0,002	0,004	0,002	0,004	0,003	0,003	0,002	
М1у	99,9	0,0005	0,002	0,001	0,005	0,002	0,004	0,001	0,004	—	0,004	—	Катодная переплавленная
М1	99,9	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,004	—	0,004	—	
М1р	99,9	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,01	0,005	0,002—0,012	Раскисленная

Примечание. Содержание серебра в меди марок М0б, М1у и М1 не должно превышать 0,003 % (мас.). По требованию потребителя медь этих марок изготовляют с содержанием серебра не более 0,0025 % (мас.).

В марках меди, предназначенных для электротехнических целей, определяют только содержание меди и удельное электрическое сопротивление.

Содержание кислорода в меди марок М1 и М1у соответствует ГОСТ 193-79.

Для электротехнической промышленности в меди марок М1у массовая доля серы не должна превышать 0,003 %, а в меди марки М0б для эмалированных проводов — 0,002 %.

Таблица 15.2. **Механические свойства проводниковой меди в зависимости от температуры**

Параметры	Температура, °С									
	20	100	200	250	300	20	100	200	250	300
	Твердотянутая медь					Отожженная медь (650 °С, 1/2 ч)				
Предел прочности при растяжении МПа	409	372	318	207	146	239	208	175	164	144
Относительное удлинение, %	5,4	5,5	6,6	27,3	54,2	47,2	46,4	42,6	38,6	40
Сужение площади поперечного сечения, %	56,1	53,8	59,3	73	61,3	71,4	72,1	61,3	60,6	51,6
Модуль упругости статический, ГПа	121,5	108,6	103,75	99,2	98	117	117,8	110,8	102	102
Модуль упругости динамический, ГПа	112	91	89	—	76	73,5	69	64	—	—
Напряжение при остаточном удлинении 0,2 % (предел текучести), МПа	396	353	295	155	47	57,5	49,5	42	40	39
Предел вибрационной усталости, МПа	95	76	59	—	35	74	66	52	—	—

да в твердой меди незначительна и при 400 °С составляет 0,06 мг в 100 г. Медь растворяется в азотной кислоте, легко соединяется с хлором и другими галогенами, горит в парах серы.

Механические свойства проводниковой меди резко зависят от ее состояния. Отожженная, мягкая медь (марки ММ) менее прочна, но более пластична, чем твердотянутая (марки МТ), подвергнутая деформации в холодном состоянии. Число Бринелля мягкой меди при 20 °С 35, нагартованной меди 65—120. Механические свойства проводниковой меди в зависимости от температуры приведены в табл. 15.2. При нагреве выше 200 °С прочность твердой меди резко снижается — происходит рекристаллизация и металл отжигается. Небольшие легирующие добавки (десятые доли процента) заметно увеличивают температуру рекристаллизации меди, повышая ее термическую стойкость. Представляют интерес для электротехники низколегированные сплавы меди с присадкой серебра, циркония, хрома, магния, ниобия, бериллия, титана и др., сочетающие высокую проводимость с повышенной жаропрочностью. Практическое применение для изготовления коллекторной заготовки, а также прутков для короткозамкнутых высокоскоростных асинхронных электродвигателей получила медь, легированная серебром (0,03—0,12 %) в соответствии с ТУ 48-21-137-72, ТУ-08-443-71, ТУ 48-08-447-71.

Тепловые и технологические свойства меди

Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(м·°С)	394,3
Удельная теплоемкость при 20 °С, Дж/(кг·°С)	385,5
Температура плавления, °С	1083±0,1
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100 °С), $°С^{-1}$	$16,4 \cdot 10^{-6}$
Температура кипения, °С	2300—2590
Температура начала рекристаллизации для бескислородной меди, °С	150
Температура рекристаллизации, °С	200—300
Температура отжига, °С	500—700
Температура горячей обработки, °С	900—1050
Температура литья, °С	1150—1200
Объемная усадка, %	4,1
Длительная температура эксплуатации в обмоточных проводах на воздухе, °С	220

15.3. ЛАТУНИ

Латуни — двойные или многокомпонентные сплавы на основе меди, в которых главной легирующей добавкой является цинк. Двойные медно-цинковые сплавы называются простыми латунями, а многокомпонентные — специальными. Латуни дешевле меди, но прочнее и тверже ее, хорошо обрабатываются в холодном и горячем состоянии.

Структура и свойства латуней в первую очередь определяются содержанием цинка.

Таблица 15.3. **Физико-механические и технологические**

Марка латуни	Плотность, $кг \cdot м^{-3}$	ρ при 20 °С, мкОм·м	ТК ρ, $°С^{-1}$	$\sigma_р$, МПа		Относительное удлинение, %		Число Бринелля	Удельная ударная вязкость, $МДж \cdot м^{-2}$
				мягкой латуни	твердой латуни	мягкой латуни	твердой латуни		
Л96	8850	0,043	0,0027	230—260	510	45—50	4	50/120*	—
Л68	8500—8600	0,068	0,0010	300—350	650—830	40—60	3—5,5	52	1,7—2,0
Л63	8500	0,071	0,0017	300—330	600	50	0,5	56	1,4
ЛЖМц59-1-1	8500	0,090	0,0018	380—450	500—520	24—50	10	80—90	—
ЛМц58-2	8500	0,108	0,0013	350—450	500—600	30—44	3—10	80—90/140*	—
ЛС59-1	8500	0,065	0,0017	340—400	450—650	20—30	5—8	75	0,46—0,48
ЛК80-3	7900—8300	0,254—0,326	$4,75 \cdot 10^{-4}$	250—300	650—900	20—25	2—10	100—120* 220—237	—

* Данные в числителе относятся к мягкому, а в знаменателе — к твердому состоянию сплава.

Практическое применение имеют сплавы с содержанием цинка до 45 %. При температурах до 453 °С цинк растворяется в твердом состоянии в меди до 39 %. Такие растворы на основе кубической гранецентрированной решетки меди однофазны и называются α-латунями. При содержании 39—46 % цинка сплавы двухфазны. Они являются композицией зерен α- и β-фаз и называются α+β латунями (β-латунь — твердый раствор на основе соединения CuZn с объемноцентрированной решеткой).

С увеличением содержания цинка до 45 % предел прочности при растяжении у латуней непрерывно возрастает. Относительное удлинение при разрыве растет по мере увеличения содержания цинка до 32 %, а затем снижается, причем особенно резко в сплавах, содержащих более 39 % цинка. Поэтому α-латуни более пластичны в холодном состоянии, чем α+β-сплавы, и хорошо обрабатываются давлением. Наиболее пластична латунь марки Л68 (32 % цинка), позволяющая изготавливать токоведущие детали сложной формы холодной штамповкой и глубокой вытяжкой. Пластичность же α-латуней в интервале 300—700 °С резко снижается, так что их горячая обработка затруднена. Напротив, α+β-сплавы повышают пластичность при температурах выше 500 °С и поэтому хорошо обрабатываются давлением в горячем состоянии.

Латуни разделяются на обрабатываемые давлением (ГОСТ 15527-70) и литейные (ГОСТ 17711-80). Марки латуней начинаются с буквы Л. В марке простой латуни цифра указывает среднее содержание меди в процентах (остальное — цинк). Простые латуни, содержащие до 10 % цинка, называются томпаками (Л96, Л90), а свыше 10 до 20 % — полутомпаками (Л85, Л80). Они отличаются хорошей пластичностью, повышенной по сравнению с другими латунями электро- и теплопроводностью. Обработка томпаков резанием затрудняется их вязкостью.

Легирующие элементы, вводимые в медные сплавы для улучшения свойств, обозначаются в марках следующими буквами: А—алюминий, Б — бериллий, Ж — железо, К — кремний, Мг — магний, Мц — марганец, Мш — мышьяк, Н — никель, О — олово, С — свинец, Кд — кадмий, Т — титан, Ф — фосфор, Цр — цирконий. В марке многокомпонентной латуни первая цифра указывает среднее содержание меди, а последующие — легирующих элементов в процентах (например, ЛАН59-3-2 содержит 59 % меди, 3 % алюминия, 2 % никеля, остальное — цинк).

В ГОСТ 17711-80 маркировка литейных латуней изменена: после буквы Л в марке ставится буква Ц, за которой следует цифра, характеризующая среднее содержание цинка в процентах, а затем буква, характеризующая легирующую присадку, и цифра, соответствующая ее содержанию в сплаве (например ЛЦ30А3 — литейная латунь, содержащая 30% цинка, 3 % алюминия, остальное — медь). Буква Л в конце марки теперь не ставится.

Для повышения механической прочности и коррозионной стойкости в латуни вводят алюминий, олово, марганец, железо, никель, кремний. Олово и мышьяк повышают стойкость к действию морской воды. Свинец повышает антифрикционные свойства латуни и облегчает обработку резанием, делая стружку ломкой, но снижает пластичность сплава. При добавке в литейные сплавы свинец улучшает их технологические свойства. Добавка марганца повышает дугостойкость сплава. Железо в количестве, большем 0,03 %, придает латуням магнитные свойства. В так называемых антимагнитных латунях содержание железа поэтому ограничивают 0,03 % и даже 0,01 %. Теллур и селен даже в малых количествах образуют с медью хрупкие соединения, что приводит к появлению трещин при обработке сплава давлением. Алюминий может ухудшить технологические свойства сплавов вследствие невозможности применения для их пайки мягких припоев, например латуней марок ЛА77-2 и ЛА67-2,5.

Латуни стойки к атмосферной коррозии, однако многие сплавы, содержащие более 20—30 % цинка, склонны к растрескиванию из-за одновременного действия остаточных напряжений в изделии и коррозионного воздействия аммиака, а также сернистого газа во влажной атмосфере. Это явление называют сезонной болезнью латуни, так как наблюдается оно в месяцы с повышенной влажностью. Растрескивание предотвращают, проводя отжиг при 250—350 °С для снятия остаточных напряжений.

После холодной деформации прочность и твердость латуней возрастают, пластичность резко снижается. Отжиг обычно в интервале 600—800 °С состояние наклепа снимает, сплав становится пластичным, его прочность и твердость уменьшаются.

Физико-механические и технологические свойства некоторых распространенных в электротехнике марок латуней, предусмотренных ГОСТ 15527-70, приведены в табл. 15.3. Перечисленные в этой таблице латуни (кроме Л96) свариваются газовой и электрической сваркой, а томпак Л96 — только газовой сваркой; кроме латуни марки ЛК80-3, которая паяется только твердыми припоями, остальные упомянутые в табл. 15.3 латуни могут паяться как мягкими, так и твердыми припоями. Механические свойства и плотность некоторых марок литейных медно-цинковых сплавов (ГОСТ 17711-80) характеризуются данными, приведенными в табл. 15.4.

свойства латуней

Удельная теплопроводность, Вт/(м· °С)	Температурный коэффициент линейное расширения, 10^{-6} °С$^{-1}$	Температура плавления, °С	Температура литья, °С	Температура отжига, °С
245	17	1070	1160—1200	650—850
109	18,5	938	1100	600—700
83,5	20	905	1020—1050	600—700
101	20,3	890	1000—1060	600—700
92	21,2	880	1000—1050	600—700
105	18,5	890	1020—1060	750—800
—	18,8—20,8	836—916	960—1080	680—700

Таблица 15. 4. **Механические свойства и плотность некоторых литейных латуней (ГОСТ 17711-80)**

Марка	Способ литья	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Число Бринелля	Плотность, кг/м³
		не менее			
ЛЦ16К4	В кокиль	350	15	110	8300
	В землю	300	15	100	8300
ЛЦ30А3	В кокиль	400	15	90	8500
	В землю	300	12	80	8500
ЛЦ40С	Центробежное и в кокиль	220	20	80	8500
	В землю	220	12	70	8500

Таблица 15.5. **Механические свойства латунной проволоки (ГОСТ 1066-80)**

Марка сплава	Размер проволоки, мм	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее			Относительное удлинение, %		
		мягкой	полутвердой	твердой	мягкой	полутвердой	твердой
Л80	0,20—5,0	300	350	—	25	15	—
Л63	0,10—0,18	380	—	700—950	20	—	—
	0,20—0,75	350	400	700—950	25	5	—
	0,80—1,40	320	380	600—800	30	10	—
	1,50—12,0	300	350	550—750	40	15	—
Л63	0,10—0,18	350	—	750—950	18	—	—
	0,20—0,50	350	450	700—950	20	5	—
	0,55—1,0	350	450	700—900	26	5	—
	1,10—4,8	350	400	600—800	30	10	—
	5,0—12,0	320	360	550—750	34	12	—
ЛС59-1	0,6—1,0	350	—	500	25	—	1
	1,1—1,9	350	—	480	27	—	3
	2,0—4,8	350	400	500—650	30	10	5
	5,0—12,0	350	400	450—650	30	12	8

Примечание. Размер проволоки: для круглой — диаметр, для квадратной и шестигранной — диаметр вписанной окружности. Квадратная и шестигранная проволока изготовляется размером от 3,0 до 12,0 мм из латуни марок Л68, Л63 и ЛС59-1.

Таблица 15.6. **Механические свойства латунных прутков (ГОСТ 2060-73)**

Марка латуни	Способ изготовления и состояние материала	Размер, мм	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
			не менее	
Л63	Прессованные	10—160	300	30
	Тянутые:			
	мягкие	3—50	300	40
	полутвердые	3—40	380	15
	твердые	3—12	450	10
ЛС59-1	Прессованные	10—160	370	18
	Тянутые:			
	мягкие	3—50	340	22
	полутвердые	3—40	400	15
	твердые	3—12	500	5
ЛС63-3	Тянутые:			
	твердые	3—9,5	600	1
		10—14	550	1
		15—20	500	1
	полутвердые	10—20	360	12
ЛО62-1	Прессованные	10—160	370	20
	Тянутые полутвердые	3—50	400	15
ЛЖС58-1-1	Прессованные	10—160	300	20
	Тянутые полутвердые	3—50	450	10

Продолжение табл. 15.6

Марка латуни	Способ изготовления и состояние материала	Размер, мм	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
			не менее	
ЛМц58-1	Прессованные	10—160	400	25
	Тянутые полутвердые	3—12	450	20
		12—50	420	20
ЛЖМц59-1-1	Прессованные	10—160	440	28
	Тянутые полутвердые	3—12	500	15
		12—50	450	17
ЛАЖ60-1-1	Прессованные	10—160	450	18

Примечание. Из латуни марки ЛС63-3 изготовляются прутки круглого профиля, из остальных марок — круглого, квадратного и шестигранного. Размер прутков: для круглых — диаметр для квадратных и шестигранных — диаметр вписанной окружности.

Таблица 15.7. **Механические свойства латунных труб общего назначения (ГОСТ 494-76)**

Способ изготовления и состояние материала	Марка латуни	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
		не менее	
Трубы тянутые и холоднокатаные мягкие	Л63	300	40
	Л68	300	40
Трубы тянутые и холоднокатаные полутвердые	Л63	380	25
	Л68	350	35
Трубы прессованные	Л60	350	20
	Л63	280	38
	ЛС59-1	400	20
	ЛЖМц59-1-1	440	28

Примечание. Трубы тянутые и холоднокатаные изготовляются с наружным диаметром от 3 до 100 мм, толщиной от 0,5 до 10 мм, трубы прессованные — диаметром от 21 до 195 мм и толщиной от 1,5 до 42,5 мм.

Таблица 15.8. **Механические свойства латунных лент общего назначения (ГОСТ 2208-75)**

Марка латуни	Состояние материала	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
Л90	Мягкий	240—350	35
	Полутвердый	300—430	10
	Твердый	⩾360	3
Л85	Мягкий	260—370	38
	Полутвердый	330—440	12
	Твердый	⩾400	3
Л80	Мягкий	270—380	40
	Полутвердый	340—440	15
	Твердый	⩾400	3
Л68	Мягкий	300—380	42
	Полутвердый	350—480	20
	Твердый	440—550	10
	Особотвердый	⩾530	—
Л63	Мягкий	300—420	38
	Четвертьтвердый	350—480	20
	Полутвердый	420—550	10
	Твердый	500—630	4
	Особотвердый	⩾600	—
ЛС59-1	Мягкий	350—500	25
	Твердый	470—650	5
	Особотвердый	⩾600	3
ЛМц58-2	Мягкий	390—500	30
	Полутвердый	430—600	15
	Твердый	⩾580	4

Примечание. Толщина лент от 0,05 мм, ширина — от 10 до 600 мм.

Простые латуни благодаря высокой пластичности легко перерабатываются в листы, полосы, прутки, ленты, проволоку, штампуются и вытягиваются, легко выдерживают резкие изгибы, свариваются и паяются. Они широко применяются для изготовления различных токопроводящих деталей электрооборудования, причем особенно часто — латуни Л68 и Л63. Латуни марок ЛМц58-2, ЛЖМц59-1-1 и ЛС59-1 перерабатываются в листы, полосы, ленты, прутки и проволоку, хорошо обрабатываются резанием и полируются, паяются и свариваются. Они применяются для изготовления стержней короткозамкнутых роторов асинхронных электродвигателей, деталей соединителей, пружинящих контактов и других токоведущих частей, от которых требуются повышенные твердость и стойкость к действию электрических разрядов, свойственные латуням с добавкой марганца.

Латуни марок ЛЦ16К4 и ЛЦ40С применяются для изготовления литых токоведущих деталей электрических машин и аппаратов, а также для заливки короткозамкнутых роторов асинхронных электродвигателей. Латуни ЛЦ16К4 и ЛЦ30А3 применяются для отливки токоведущих деталей, обладающих повышен-

Таблица 15.9. **Механические свойства латунных листов и полос (ГОСТ 931-78)**

Метод изготовления	Марка латуни	Состояние материала	Предел прочности при растяжении, МПа (не менее)	Относительное удлинение, % (не менее)
Холоднокатаные	Л90	Мягкий	240	35
		Полутвердый	300	10
		Твердый	360	3
	Л85	Мягкий	260	38
		Полутвердый	330	12
		Твердый	400	3
	Л80	Мягкий	270	40
		Полутвердый	340	15
		Твердый	400	3
	Л68	Мягкий	300	42
		Полутвердый	350	20
		Твердый	440	10
		Особотвердый	530	—
	Л63	Мягкий	300	38
		Четвертьтвердый	350	20
		Полутвердый	420	10
		Твердый	500	4
		Особотвердый	600	—
	ЛС59-1	Мягкий	350	25
		Твердый	470	5
	ЛМц58-2	Мягкий	390	30
		Полутвердый	430	15
		Твердый	600	3
	ЛО62-1	Твердый	400	5
Горячекатаные	Л63	—	300	30
	ЛО62-1	—	350	20
	ЛС59-1	—	370	18
	ЛМц58-2	—	400	25

Примечание. Толщина горячекатаных листов от 5 до 25 мм, холоднокатаных от 0,4 до 12 мм. Размер листов от 600×1500 до 1000×2000 мм². Толщина холоднокатаных полос от 0,4 до 10 мм, ширина — от 40 до 500 мм.

ной механической прочностью и твердостью, но паяющихся только твердыми припоями. Механические свойства полуфабрикатов, изготовленных из латуней, обрабатываемых давлением, приведены в табл. 15.5—15.9.

15.4. ПРОВОДНИКОВЫЕ БРОНЗЫ

Бронзами называются сплавы меди с различными химическими элементами, кроме цинка и никеля. Бронзы по сравнению с медью отличаются высокой механической прочностью, твердостью, упругостью как при нормальной, так и при повышенной температурах, стойкостью к истиранию.

Марки бронз начинаются буквами Бр, затем идут буквы, соответствующие наименованию легирующих элементов (см. § 15.3), и цифры, указывающие их среднее содержание в сплаве в процентах. Например, бронза БрОЦС4-4-2,5 содержит 4 % олова, 4 % цинка, 2,5 % свинца, остальное — медь.

Наибольший интерес для электротехники представляют бронзы, сочетающие высокую проводимость с прочностью и твердостью (кадмиевая и хромовая бронзы), а также особо прочные сплавы с достаточно хорошей проводимостью (бериллиевые бронзы). Проводниковые бронзы применяются для изготовления контактных проводов для электрического транспорта, коллекторных пластин, контактных ножей, скользящих контактов, токоведущих пружин, упругих контактных элементов и пр.

Упрочнение некоторых бронз (например, хромовой и бериллиевой) достигается специальной термической обработкой в результате процесса дисперсионного твердения. Для создания термически упрочняемых сплавов применяют такие легирующие элементы, которые образуют с медью или между собой соединения, растворимость которых в твердом растворе на основе меди уменьшается с понижением температуры. При быстром охлаждении (закалке) таких сплавов образуется пересыщенный твердый раствор, из которого при высокотемпературном старении (облагораживающем отжиге) выделяются тонкодисперсные интерметаллические соединения, упрочняющие сплав. Вследствие выделения этой фазы из твердого раствора удельная проводимость сплава повышается. Сравнительные свойства некоторых проводниковых бронз приведены в табл. 15.10.

Бронзы разделяются на бронзы оловянные, обрабатываемые давлением (ГОСТ 5017-74), бронзы оловянные литейные (ГОСТ 613-79), бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением (ГОСТ 18175-78), а также бронзы безоловянные литейные (ГОСТ 493-79).

Оловянные бронзы содержат от 3 до 8 % олова. Упрочняющее влияние олова на механические свойства меди аналогично влиянию цинка, но выражено более резко. Пластичность сплава повышается с увеличением содержания олова до 5—6 %, а затем начинает падать, особенно резко в сплавах, содержащих более 7—8 % присадки. Для изготовления полуфабрикатов широкое применение нашли оловянно-фосфористые бронзы БрОФ6,5-0,15 и БрОФ7-0,2. Фосфор вводится как раскислитель и устраняет хрупкие включения окиси олова SnO, а также повышает антифрикционные свойства сплава.

Физические и технологические свойства бронзы БрОФ6,5-0,15

Плотность, кг/м³	8800
Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	105
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100 °С), °С$^{-1}$	$17 \cdot 10^{-6}$
Удельное сопротивление (20 °С), мкОм·м	0,13
Температурный коэффициент удельного сопротивления (20—100 °С), °С$^{-1}$	0,00073
Температура плавления, °С	1050
Температура отжига, °С	720

Применяются также оловянно-цинковые бронзы, содержащие до 5% цинка, удешевляющего сплав. Цинк в таких количествах раст-

Таблица 15.10. Сравнительные свойства некоторых проводниковых бронз

Тип бронзы	Состояние	Удельная проводимость по отношению к стандартной меди, %	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
Кадмиевая (1 % Cd)	Твердотянутая	83—90	500	3—4
Циркониевая (0,5 % Zr)	Твердотянутая	85—90	500	3—4
Хромовая (0,5 % Cr)	Остаренная после закалки	86	500—530	10—12
Оловянно-фосфористая (7 % Sn, 0,1 % P)	Твердотянутая	10—15	1050	3
	Отожженная	10—15	400	60
Бериллиевая (2,25 % Be)	Остаренная после закалки	24	1100	8
	Твердотянутая после старения	—	1350	1,5

воряется в меди и не влияет существенно на структуру. Оловянные бронзы обрабатываются резанием, полируются, свариваются газовой и электрической сваркой, паяются мягкими и твердыми припоями, но отличаются повышенным удельным сопротивлением.

Физические и технологические свойства бронзы БрОЦ4-3

Плотность, кг/м³	8900
Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	92
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100 °С) $°C^{-1}$	$18 \cdot 10^{-6}$
Удельное сопротивление (20 С), мкОм·м	0,095
Температура плавления, °С	1045
Температура отжига, °С	600—700

Кадмиевая бронза БрКд1, содержащая около 1 % кадмия, обладает в твердом состоянии сравнительно малым удельным сопротивлением — не более 0,0205 мкОм·м, высокими прочностью (см. табл. 15.10), твердостью (число Бринелля 95—115), стойкостью к истиранию и поэтому применяется для изготовления контактных проводов, коллекторных пластин, контактов силовых электрических аппаратов и пр. Конкурентами кадмиевой бронзы являются циркониевая БрЦр0,5, магниево-циркониевая БрМгЦр0,15-0,15 и магниевая БрМг0,25 бронзы, обладающие в твердом состоянии удельным сопротивлением не больше (соответственно) 0,0200; 0,0215 и 0,0220 мкОм·м и имеющие предел прочности при растяжении до 500 МПа при относительном удлинении 3—4 %. Эти бронзы применяются для изготовления контактных проводов. Циркониевая бронза применяется также для изготовления коллекторных пластин (число Бринелля — не менее 115 согласно ТУ 48-21-222-72). Ленты из циркониевой бронзы марки БрЦр0,2, поставляемые в соответствии с ТУ 48-21-30-72 толщиной 0,4—1,0 мм в твердом состоянии, должны иметь удельное сопротивление не более 0,0188 мкОм·м. Ленты из магниевой бронзы марки БрМг0,8, поставляемые согласно ТУ 48-21-123-72 толщиной от 0,1 до 0,5 мм в твердом состоянии, должны иметь предел прочности при растяжении не менее 600 МПа при удельном сопротивлении не больше 0,037 мкОм·м. Из магниевой бронзы, содержащей от 0,1 до 0,35 % магния, в соответствии с ЦМТУ 08-38-67 изготовляются коллекторные полосы с числом Бринелля не менее 90.

Хромовая бронза БрХ0,5 сочетает после закалки (900—1000 °С) и облагораживающего отжига при 400 °С высокую проводимость с хорошей механической прочностью (см. табл. 15.10). Хромовая бронза сохраняет твердость при нормальной температуре после нагрева до 400°С, предел усталости при переменной нагрузке примерно вдвое, а предел ползучести втрое выше, чем у меди. У этой бронзы число Бринелля до 150—180. Из хромовой бронзы в соответствии с ЦМТУ 08-203-69 изготовляются полосы толщиной от 3 до 8 мм, по ЦМТУ 08-144-69 — полосы толщиной от 1 до 8 мм с удельным сопротивлением не более 0,030 мкОм·м, а согласно ТУ 24-21-154-72 — полосы коллекторные. В соответствии с ТУ 48-08-395-71 поставляются профили из хромовой бронзы для контактов электрических аппаратов.

Физические свойства бронзы БрХ0,5

Плотность, кг/м³	8900
Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	334
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100 °С), $°C^{-1}$	$15{,}8 \cdot 10^{-6}$
Удельное сопротивление (20 °С) после закалки и отжига, мкОм·м	0,020
Температурный коэффициент удельного сопротивления (20—100 °С), $°C^{-1}$	0,0035
Температура плавления, °С	1076

Бериллиевые бронзы также упрочняются дисперсионным твердением. Распространение получили сплавы, содержащие около 2 % бериллия. Температура их закалки 800 °С, температура облагораживающего отжига 320 °С. После термообработки эти бронзы весьма прочны и тверды (число Бринелля 350—370), имеют высокие пределы упругости, текучести и усталости, отличаются высокой электрической проводимостью и теплопроводностью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, холодостойкостью. Сплавы немагнитны, не дают искры при ударах. Бериллиевые бронзы дополнительно упрочняются после холодной деформации. Бериллиевые бронзы широко применяются для изготовления упругих токоведущих элементов и деталей скользящих и разрывных контактов. Однако эти сплавы дороги, а их производство затруднено токсичностью бериллия.

Физические свойства бронзы БрБ2

Плотность, кг/м³	8230
Удельная теплопроводность облагороженной бронзы, Вт/(м·°С)	104,5
Удельное сопротивление (20 °С), мкОм·м:	
закаленной бронзы	0,10
облагороженной	0,068
Температура плавления, °С	955

В табл. 15.11—15.13 приведены свойства полуфабрикатов, изготовленных из проводниковых бронз, обрабатываемых давлением.

Таблица 15.11. **Механические свойства бронзовой проволоки**

ГОСТ	Марка бронзы, состояние материала	Диаметр, мм	Предел прочности при растяжении, МПа (не менее)	Относительное удлинение, % (не менее)
5221-77	БрОЦ4-3	0,1—2,5	900	0,5
		2,5—4,0	850	1,0
		4,0—8,0	830	1,0
		8,0—12,0	780	2,0
	БрОЦ4-3 (квадратная проволока)	0,6—1,2	850	—
		1,2—2,0	800	—
		2,0—3,0	780	1,0
5222-72	БрКМц3-1	0,1—1,0	900	—
		1,1—2,6	900	0,5
		2,8—4,2	850	1,0
		4,5—8,0	830	1,5
		8,5—10,0	780	2,0
15834-77	БрБ2 мягкая (после закалки)	0,06—0,08	343—686	15—45
		0,10—0,50	392—637	20—45
		0,55—1,00	392—637	20—45
		1,10—5,0	392—637	25—60
		5,50—12,00	392—588	30—60
	БрБ2 твердая (холоднодеформированная после закалки)	0,06—0,08	931—1372	—
		0,10—0,50	931—1372	—
		0,55—1,00	833—1274	—
		1,10—5,0	735—1176	—
		5,50—12,00	735—1078	—
	БрБ2 после дисперсионного твердения из мягкого состояния	0,06—0,90	1078—1470	—
		1,00—12,00	1078—1568	—
	БрБ2 после дисперсионного твердения из твердого состояния	0,06—0,90	Не менее 1176	⩾1,0
		1,00—12,00	Не менее 1176	⩾1,0

Примечания: 1. Проволока из кремнемарганцовой бронзы круглая изготавливается всех диаметров, квадратного сечения — от 0,6 до 3,5 мм. За диаметр квадратной проволоки принимается диаметр вписанной окружности.

2. Для проволоки из бериллиевой бронзы первых трех типов для механических свойств приведены граничные значения. Удельное электрическое сопротивление проволоки из бронзы марки БрБ2 должно быть для мягкой без дисперсионного твердения 0,10 мкОм·м, после дисперсионного твердения 0,07 мкОм·м, для твердой без и после дисперсионного твердения соответственно 0,20 и 0,08 мкОм·м.

Таблица 15.12. **Механические свойства прутков из бронзы**

ГОСТ	Марка	Способ изготовления прутков	Диаметр, мм	Состояние материала	Предел прочности при растяжении, МПа (не менее)	Относительное удлинение, % (не менее)	Число Бринелля (не менее)
10025-78	БРОФ6,5-0,15	Тянутые или холоднокатаные	5—20	Мягкий	360	40	70
				Полутвердый	400	18	120
				Твердый	480	12	140
				Особотвердый	560	6	150
		Прессованные	100—110	—	350	55	70
	БрОФ7-0,2	Тянутые или холоднокатаные	16—40	Мягкий	400	40	80
				Полутвердый	450	15	130
				Твердый	530	10	150
				Особотвердый	580	6	180
		Прессованные	40—95	—	370	55	70
6511-60	БрОЦ4-3	Тянутые	5—12	—	440	10	
			13—25		380	15	
			23—35		340	16	
			36—40		320	16	
		Прессованные	42—120	—	290	25	

Таблица 15.13. **Механические свойства бронзовых полос и лент**

ГОСТ	Марка бронзы,	Состояние материала	Толщина, мм	Предел прочности при растяжении, МПа (не менее)	Относительное удлинение, % (не менее)	Твердость по Виккерсу
1761-79	БрОФ6,5-0,15	Мягкий	—	300	38	—
		Полутвердый		450—580	10	
		Твердый		580	5	
		Особотвердый		700	—	
	БрОЦ4-3	Мягкий	—	300	38	—
		Полутвердый		360—550	8	
		Твердый		550	4	
		Особотвердый		700	—	
1789-70	БрБ2	Мягкий (после закалки)	<0,15	—	—	≤130
			0,15—0,25	400—600	20	
			>0,25	400—600	30	
	БрБНТ1,9	Мягкий (после закалки)	<0,15	—	—	≤120
			0,15—0,25	400—600	20	
			>0,25	400—600	30	
	БрБ2	Твердый (деформированный после закалки на 30—40 %)	<0,15	—	—	≥170
			0,15—0,25	600—900	—	
			>0,25	650—950	2,5	
	БрБНТ1,9		<0,15	—	—	≥160
			0,15—0,25	600—900	—	
			>0,25	650—950	2,5	
	БрБНТ1,7		<0,15	—	—	≥150
			0,15—0,25	600—950	—	
			>0,25	600—950	2,5	
	БрБ2	Облагороженный после закалки	<0,15	—	—	≥330
			0,15—0,25	1100—1500	—	
			>0,25	1150—1500	2,0	
	БрБНТ1,9		<0,15	—	—	≥330
			0,15—0,25	1100—1500	—	
			>0,25	1150—1500	2,0	
	БрБ2	Облагороженный после закалки (после деформации на 30—40 %)	<0,15	—	—	≥360
			0,15—0,25	1150—1600	—	
			>0,25	1200—1600	1,5	
	БрБНТ1,9		<0,15	—	—	≥360
			0,15—0,25	1150—1600	—	
			>0,25	1200—1600	1,5	
	БрБНТ1,7		<0,15	—	—	≥340
			0,15—0,25	1100—1500	—	
			>0,25	1100—1500	2,0	

Из литейных оловянных и безоловянных бронз изготовляются литые токоведущие детали сложной формы с удельной проводимостью, составляющей примерно 10 % проводимости стандартной меди. Высокие литейные свойства бронз определяются их исключительно малой усадкой. Усадка оловянной бронзы меньше 1, тогда как усадка латуней и чугуна — около 1,5, а сталей — более 2. Легирующими элементами литейных безоловянных бронз являются алюминий, железо, марганец, никель и свинец.

15.5. АЛЮМИНИЙ

Алюминий — наиболее распространенный в природе металл. Его содержание в земной коре составляет около 7,5 % и сырьевые ресурсы практически неисчерпаемы. В связи с острой дефицитностью меди роль алюминия как проводникового металла высокой проводимости неуклонно возрастает.

Общие физические свойства алюминия

Атомный номер	13
Атомная масса	26,98
Плотность (99,5 % алюминия по массе) при 20 °С, кг/м³	2703

Достоинствами алюминия являются легкость (в 3,3 раза легче меди), высокая электрическая проводимость (удельная проводимость чистого алюминия составляет 65,5 % проводимости стандартной меди), пластичность, хорошая технологичность, коррозионная стойкость.

Алюминиевый провод по сравнению с медным той же длины при одинаковом сопротивлении имеет примерно на 65 % большее сечение (диаметр больше на 28 %), однако он при этом будет почти в 2 раза легче. Существенно уступает алюминий меди в механической прочности.

Марки алюминия, поставляемые отечественной промышленностью в соответствии с ГОСТ 11069-74, и их химический состав приведены в табл. 15.14. Наличие примесей увеличивает удельное сопротивление алюминия. В проводниковом алюминии содержание примесей не должно превышать 0,5 %. Для применения в электротехнических изделиях предусмотрены специальные марки А5Е и А7Е (вновь введенная марка), для которых нормируется удельное сопротивление. Железо и кремний являются основными примесями, сопутствующими алюминию, причем минимальное сопротивление наблюдается при оптимальном их соотношении. В связи с этим, в частности, регламентировано минимальное содержание железа в алюминии марки А5Е. Резко снижают проводимость алюминия даже тысячные доли процента титана, ванадия, марганца и хрома. Поэтому их содержание в марках А7Е и А5Е специально ограничено.

Электрические свойства алюминия

Удельное сопротивление высокочистого отожженного алюминия (0,003—0,004 % примесей) при 20 °С, мкОм·м	0,0262
Удельная проводимость высокочистого отожженного алюминия при 20 °С, МСм/м	38
Удельное сопротивление отожженной при 350±20 °С проволоки из алюминия А5Е при 20 °С, мкОм·м, не более	0,0280
Удельное сопротивление отожженной при 350±20 °С проволоки из алюминия А7Е при 20 °С, мкОм·м, не более	0,0277
Температурный коэффициент удельного сопротивления (0—150 °С), $°C^{-1}$	0,004
Отношение сопротивления расплавленного алюминия к сопротивлению твердого алюминия (при температуре плавления)	1,64
Работа выхода электронов, эВ	4,3

Холодная обработка алюминия сравнительно мало влияет на его проводимость. При обжатиях до 95—98 % уменьшение удельной проводимости не превышает 1—2 %.

Таблица 15.14. **Химический состав алюминия различных марок (ГОСТ 11069-74)**

Марка	Al, %, не менее	Примеси, %, не более							Цветная маркировка
		Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Прочие примеси, каждой	Всего контролируемых примесей	
Алюминий особой чистоты									
А999	99,999	—	—	—	—	—	—	0,001	
Алюминий высокой чистоты									
А995	99,995	0,0015	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	Буква А, голубого цвета
А99	99,99	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001	0,01	Буква А, белого цвета
А97	99,97	0,01	0,01	0,005	0,003	0,002	0,002	0,03	Буква А, желтого цвета
А95	99,95	0,03	0,03	0,01	0,005	0,002	0,005	0,05	Буква А, красного цвета
Алюминий технической чистоты									
А85	99,85	0,08	0,06	0,01	0,02	0,01	0,02	0,25	Одна голубая полоса
А8	99,80	0,12	0,10	0,01	0,04	0,02	0,02	0,30	Две голубые полосы
А7	99,70	0,20	0,16	0,01	0,04	0,02	0,02	0,10	Одна белая полоса
А7Е	99,70	0,20	0,08	0,01	0,04	0,01*	0,02	0,30	Три желтые полосы
А6	99,60	0,25	0,20	0,01	0,06	0,03	0,03	0,40	Две белые полосы
А5	99,50	0,30	0,30	0,02	0,06	0,03	0,03	0,50	Одна красная полоса
А5Е	99,50	0,35**	0,12	0,02	0,04	0,01*	0,02	0,50	Одна желтая полоса
АО	99,00	0,50	0,50	0,02	0,08	0,03	0,03	1,00	Две красные полосы

* Для суммы Ti+V+Mn+Cr.
** Железа не менее 0,18 %.

Примечания: 1. В алюминии технической чистоты всех марок предприятие-изготовитель должно гарантировать содержание марганца не более 0,01 % и магния не более 0,02 %.

2. По соглашению сторон в алюминии высокой и технической чистоты, предназначенном для производства алюминиевых деформируемых сплавов системы алюминий—магний, содержание натрия не должно превышать 0,002 %.

3. В алюминии марки А5Е допускается содержание кремния до 0,15 % и суммы примесей титана, ванадия, марганца и хрома до 0,015 % при условии соответствия требованиям по электросопротивлению.

4. По соглашению сторон в алюминий, поставляемый в виде слитков для обработки давлением, вводится титан в количестве до 0,1 % для марок А85, А8, А7, А6 и А5 и до 0,15 % для марки АО. В этих случаях при определении марки алюминия содержание титана не учитывается.

Таблица 15.15. **Химический состав проводникового алюминия специальных марок, %**

Марка алюминия	Алюминий не менее	Примеси не более						
		Fe	Si	Cu	Zn	Ti*	Прочие (каждой в отдельности)	Всего
А75К	99,75	0,12	0,12	0,01	0,02	0,008	0,02	0,25
А8К	99,80	0,12	0,10	0,01	0,02	0,012	0,02	0,20
А8КУ	99,80	0,12	0,10	0,01	0,02	0,008	0,02	0,20

* Для суммы титан+ванадий+марганец+хром.

Минцветметом в 1977 г. разработаны ТУ, распространяющиеся на цилиндрические слитки из алюминия, предназначенные для изготовления прессованных токопроводящих жил. Слитки изготовляются из алюминия марки А5Е по ГОСТ 11069-74 и проводникового алюминия специальных марок А75К, А8К и А8КУ. Химический состав алюминия специальных марок приведен в табл. 15.15. В алюминии марок А75К и А8КУ содержание суммы примесей титан+ванадий+марганец+хром уменьшено по сравнению с алюминием марок А7 и А8 по ГОСТ 11069-74, снижено и содержание цинка. Удельное сопротивление прессованных жил, полученных из алюминия специальных марок, ниже, чем при применении алюминия марки А5Е, и не должно превышать указанных ниже значений:

Марка алюминия	ρ, мкОм·м
А5Е	0,0289
А75К	0,0283
А8К	0,0282
А8КУ	0,0280

Алюминий, обладая большим сродством к кислороду, окисляется на воздухе, покрываясь прочной тонкой оксидной пленкой, защищающей металл от дальнейшего окисления и обеспечивающей его высокую коррозионную стойкость в атмосфере, в том числе и загрязненной. На чистый алюминий не действуют водяной пар, пресная и морская вода. С концентрированной и разбавленной азотной кислотой на холоде алюминий не взаимодействует, но растворяется при нагревании в разведенной серной и азотной кислотах. Алюминий легко растворяется в щелочах, образуя алюминаты с выделением водорода. Алюминий, обладающий по отношению к большинству металлов отрицательным электрохимическим потенциалом, в присутствии влаги может разрушаться вследствие электрохимической коррозии, находясь в контакте с медью, цинком, никелем, железом и многими другими металлами, с которыми он образует гальванические пары. Для защиты от этого вида коррозии места соединения алюминия с медью и другими металлами надо тщательно защищать от воздействия влаги лаковыми пленками или иными способами.

Оксидная пленка обладает электроизоляционными свойствами и создает большое переходное сопротивление в месте контакта алюминиевых проводов. Поэтому пайка алюминия обычными методами невозможна. Для пайки алюминия применяются специальные пасты-припои и ультразвуковые паяльники, разрушающие оксидную пленку. Для соединения алюминиевых проводов применяется и холодная сварка — пластическое обжатие контакта, при котором пленка окисла растрескивается и выдавливается из зоны контакта, а очищенные поверхности металла прочно соединяются.

Механические свойства алюминия зависят от чистоты металла и степени его деформации при холодной обработке. Алюминий высокой чистоты (0,004 % примесей) в отожженном состоянии обладает малой прочностью, но очень пластичен: предел прочности при растяжении около 50 МПа, относительное удлинение при разрыве примерно 50 %, число Бринелля 17. После холодной деформации предел прочности возрастает до 115 МПа, число Бринелля — до 27, а удлинение снижается до 5 %.

Таблица 15.16. **Механические свойства проводникового алюминия в зависимости от температуры**

Параметры	Температура, °С											
	20	50	100	150	200	250	300	20	100	150	200	250
	Твердотянутый алюминий							Отожженный алюминий (300 °С, 2 ч в масле)				
Предел прочности при растяжении, МПа	147	140	132	107	83	60	29	90	78	67	50	38
Относительное удлинение, %	14	11,5	9,5	10,7	12,2	14,3	46	33,1	32,8	34,7	35,1	33,3
Сужение площади поперечного сечения, %	77,5	79,1	74,3	76,1	81,7	86,4	95,7	84,4	78,2	83,0	82,3	83,7
Модуль упругости статический, ГПа	72	65,5	64,95	54,75	55	47,3	47,7	66	65,8	56,4	56,6	58,9
Модуль упругости динамический, ГПа	65,9	60	62	61	51,7	39,1	—	53,7	41,4	—	42	40,5
Напряжение при остаточном удлинении 0,2 % (предел текучести), МПа	131	127	119	86	64	40	17	44	41	44	30,3	22,6
Предел вибрационной усталости, МПа	76	67	67	41	29	16,5	—	27	25	—	19,5	15,5

Алюминий технической чистоты с более высоким содержанием примесей более прочен, но менее пластичен. Проводниковый алюминий, содержащий 0,5 % примесей, имеет в отожженном состоянии предел прочности при растяжении 80—90 МПа, относительное удлинение 25—33 %, число Бринелля 15—25. После холодной обработки предел прочности повышается до 150—250 МПа (в зависимости от степени деформации), твердость — до 33—50, а удлинение снижается до 5—14 %. Типичная зависимость механических свойств проводникового алюминия, содержащего 0,5 % примесей, от температуры приведен в табл. 15.16. Значительное снижение механической прочности твердотянутого алюминия начинается при температурах выше 100 °С, что является следствием рекристаллизации деформированного металла. Температура рекристаллизации сильнодеформированного чистого алюминия лежит вблизи 150 °С, однако при длительном нагреве рекристаллизация может наступить и при более низких температурах.

Тепловые и технологические свойства алюминия

Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(м·°С)	209
Удельная теплоемкость при 20 °С, Дж/(кг·°С)	922
Температура плавления, °С (в зависимости от чистоты металла)	660—657
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100 °С), $°C^{-1}$	$24 \cdot 10^{-6}$
Температура кипения, °С	2500
Температура отжига, °С	350—400
Температура литья, °С	700—760
Объемная усадка, %	6,5
Длительная температура эксплуатации в обмоточных проводах на воздухе, °С	300

15.6. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Алюминиевые сплавы сочетают легкость с повышенной по сравнению с алюминием механической прочностью. Электрические, механические и технологические свойства сплавов можно регулировать легирующими добавками. По способу производства изделий алюминиевые сплавы делятся на деформируемые и литейные.

Для изготовления электротехнической проволоки, шин, фольги и других изделий применяются деформируемые алюминиевые сплавы, легированные одновременными добавками кремния и магния. Эти добавки мало снижают проводимость алюминия, но за счет образования соединения Mg_2Si упрочняют сплав. При температуре выше 500 °С Mg_2Si находится в алюминии в твердом растворе. При быстром охлаждении, когда растворимость падает, образуется пересыщенный раствор и избыток Mg_2Si выпадает из твердого раствора в виде тонкодисперсной структурной составляющей, увеличивающей механическую прочность сплава вследствие процесса дисперсионного твердения. Выпадение избытка Mg_2Si может проходить при длительной выдержке сплава при комнатной температуре (низкотемпературное старение). Процесс ускоряется и эффект его усиливается, если применить высокотемпературное старение — подогрев сплава до 150—200 °С. В результате выхода фазы Mg_2Si из твердого раствора проводимость сплава повышается.

К системе алюминий — магний — кремний относится проводниковый сплав АВЕ, предназначенный для изготовления электротехнической проволоки. Катанка из этого сплава поставляется в соответствии с ТУ 48-5-86-74. Основными компонентами сплава АВЕ являются магний (0,45—0,65 %), кремний (0,45—0,65 %) и железо (сопутствующий элемент, 0,45—0,70 %). Предельное содержание примесей: цинка 0,05 %, меди 0,05 %, прочих 0,1 %. Особо, как и у алюминия, ограничивается суммарное содержание титана, ванадия, марганца и хрома —не более 0,015 %. Удельное сопротивление сплава АВЕ находится в пределах 0,0295—0,033 мкОм·м, предел прочности при растяжении (после термообработки, закалки и старения) 290 МПа, относительное удлинение 5 %.

Для изготовления токоведущих шин применяется проводниковый сплав АД-31 той же системы, содержащий 0,4—0,9 % магния и 0,3—0,7 % кремния. Шины из этого сплава закаленные, естественного (низкотемпературного) старения менее прочны, чем после искусственного (высокотемпературного) старения. Удельное сопротивление этого сплава в среднем составляет 0,034 мкОм·м (после высокотемпературного старения оно несколько ниже, а после низкотемпературного — выше).

Короткозамкнутые роторы асинхронных двигателей общего назначения обычно заливаются алюминием, удельная проводимость которого принимается равной 32 МСм/м с возможными отклонениями в пределах ±8 %. Такие значения проводимости получаются при применении алюминия марок А5 или А7, так как в процессе расплавления и заливки роторов происходит загрязнение металла, снижающее

Таблица 15.17. **Алюминиевые сплавы для заливки роторов асинхронных двигателей по нормали ОАА.641.000-59**

Группа	Марка сплава	Удельная проводимость при 20 °С, МСм/м	Основные компоненты, %						Примеси, %, не более		
			Si	Cu	Mn	Zn	Mg	Al	Fe	Si	Cu
I	Алюминий чистый	32	—	—	—	—	—	99,1	0,7	0,3	0,05
II	АКМ2-1	25	1,5—2,5	1—2	—	—	—	Ост.	0,7	—	—
	АК3	25	3—4	—	—	—	—	»	0,7	—	—
III	АК10	19	9—11	—	—	—	—	»	0,7	—	—
	АКМ4-4	19	3—5	3—5	—	—	—	»	0,7	—	—
	АМг7	19	—	—	—	—	5,5—7,5	»	0,7	0,3	—
IV	АКМ12-4	15	11—13	3—4	—	—	—	»	0,7	—	—
	АКМц10-2	15	9—11	—	1,5—2	—	—	»	0,7	—	—
	АКЦ11-12	12	10—12	—	—	11—13	—	»	0,7	—	—
	АКМг1-9	12	0,8—1,3	—	—	—	8—10	»	0,7	—	—

Таблица 15.18. **Физико-механические свойства алюминиевых сплавов для заливки роторов асинхронных двигателей по нормали ОАА.641.000-59**

Марка сплава	Удельная проводимость, МСм/м		Средний температурный коэффициент линейного расширения (20—150 °С), 10^{-6} °С$^{-1}$	Плотность, кг/м^3	Температура плавления, °С	Механические свойства образцов, отлитых в кокиль		
	100 °С	150 °С				Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Число Бринелля
Алюминий чистый	24,0	21,0	23,4	2700	658	90—120	20—30	20—25
АКМ2-1	19,5	17,5	22,8	2750	580—650	100—140	6—10	35—50
АК3	19,5	17,5	23,0	2650	580—650	100—140	6—10	35—50
АК10	14,5	13,0	21,0	2600	590—600	120—140	3—5	45—60
АКМ4-4	15,5	14,5	22,9	2850	580—620	140—180	2—3	50—70
АМг7	12,5	11,5	23,5	2600	550—600	160—200	2—6	60—80
АКМ12-4	12,5	11,5	21,0	2750	540—620	140—180	1—3	50—70
АКМц10-2	12,5	11,0	21,0	2700	580—600	140—160	1—2	60—70
АКЦ11-12	10,5	10,0	21,4	3000	525—600	180—300	0,8—2	90—140
АКМг1-9	10,5	10,0	24,5	2550	550—605	160—200	0,5—1,5	70—85

Примечание. Колебания удельной проводимости ±8 %.

его проводимость. Для заливки роторов двигателей с особыми характеристиками (повышенным скольжением, увеличенным пусковым моментом и др.) применяются приведенные в табл. 15.17 литейные алюминиевые сплавы с пониженной удельной проводимостью (от 25 до 12 МСм/м). Физико-механические свойства этих сплавов приведены в табл. 15.18. Температура сплавов при литье под давлением должна быть в пределах 640—700 °С, а при центробежном литье 700—760 °С. Сплавы марок АК10, АКМц10-2, АКМ12-4 и АКЦ11-12 обладают высокими литейными свойствами. Чистый алюминий и сплавы марок АК3, АКМ2-1, и АКМ-4 имеют ограниченные литейные свойства, рекомендуются для заливки роторов с тонкими стержнями. Сплавы АМг7 и АКМг1-9 имеют невысокие литейные свойства, подвержены окислению при заливке и применяются в специальных случаях.

15.7. СПЛАВЫ ВЫСОКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

К сплавам высокого сопротивления, применяемым для изготовления токоведущих частей электроизмерительных приборов и образцовых резисторов, предъявляется комплекс особых требований. Они должны иметь высокое удельное электрическое сопротивление для уменьшения размеров и массы, малый температурный коэффициент удельного сопротивления, обеспечивающий стабильность электрического сопротивления прибора или эталона при изменении их температуры, достаточную стабильность удельного сопротивления во времени, малую удельную термо-ЭДС в паре с медью для уменьшения ошибок измерения вследствие возникновения паразитных термо-ЭДС, хорошую технологичность, позволяющую получать тонкую гибкую проволоку и другие полуфабрикаты.

В значительной степени этим требованиям удовлетворяет выпускаемый в соответствии с ГОСТ 492-73 сплав на медной основе — манганин двух марок: МНМц3-12 и МНМцАЖ3-12-0,3-0,3. Химический состав сплавов этих марок приведены в табл. 15.19. Основной легирующей добавкой манганина является марганец (об этом же говорит и само название сплава, так что его следует считать медно-марганцовым сплавом). Вследствие легирования марганцем зависимость электрического сопротивления манганина от температуры имеет вид параболы с максимумом вблизи комнатных температур (32—40 °С), благодаря чему удельное сопротивление сплава в интервале температур $-100 \div +100$ °С меняется очень мало, особенно после специальной термообработки — стабилизирующего отжига при 400 °С в нейтральной среде с медленным охлаждением и последующей длительной выдержкой при комнатной температуре. Стабилизирующая обработка обеспечивает практическую неизменность сопротивления сплава во времени и с изменением температуры (весьма малый температурный коэффициент удельного сопротивления — около 10^{-6} °С$^{-1}$). Стабилизированный

Таблица 15.19. **Марки и химический состав некоторых медно-никелевых сплавов высокого сопротивления, обрабатываемых давлением (ГОСТ 492-73)**

Наименование сплава	Марка	Химический состав, %						
		Al	Fe	Mn	Zn	Ni+Co	Cu	Примеси (всего) не более
Манганин	МНМц3-12	—	—	11,5—13,5	—	2,5—3,5	Ост.	0,9
Манганин	МНМцАЖ3-12-0,3-0,3	0,2—0,4	0,2—0,5	11,5—13,5	—	2,5—3,5	»	0,4
Константан	МНМц40-1,5	—	—	1,0—2,0	—	39—41	»	0,9
Нейзильбер	МНЦ15-20	—	—	—	18—22	13,5—16,5	»	0,9

манганин нежелательно нагревать во время эксплуатации выше +60 °С во избежание изменения его свойств, хотя сплав свободно может выдерживать 200—300 °С. Введение никеля снижает удельную термо-ЭДС манганина в паре с медью и сдвигает максимум температурной зависимости сопротивления сплава в область более низких температур. Наличие в сплаве никеля послужило основанием для причисления манганина к медно-никелевым сплавам, марки которых начинаются буквами МН, хотя никель и не является основным легирующим элементом. Никель образует с медью твердый раствор в любом соотношении, повышая механическую прочность меди, коррозионную стойкость, удельное электрическое сопротивление, снижает температурный коэффициент удельного сопротивления. Добавки алюминия и железа в манганин марки МНМцАЖ3-12-0,3-0,3 оказывают стабилизирующее влияние на удельное сопротивление сплава, существенно снижая температурный коэффициент удельного сопротивления. Некоторые физические и технологические свойства манганина приведены в табл. 15.20. Малое значение удельной термо-ЭДС в паре с медью и высокая стабильность электрического сопротивления во времени и с изменением температуры являются преимуществами манганина при изготовлении образцовых резисторов и электроизмерительных приборов самых высоких классов точности.

Хорошая технологичность позволяет изготавливать из манганина проволоку, полосы, фольгу. В соответствии с ГОСТ 10155-75 проволока манганиновая неизолированная изготовляется диаметром от 0,02 до 6,00 мм. По состоянию материала проволока должна изготовляться: твердой — из манганина марки МНМц3-12 всех диаметров, мягкой — из манганина марок МНМц3-12 и МНМцАЖ3-12-0,3-0,3 диаметром 0,5 мм и более. Проволока диаметром менее 0,5 мм в мягком состоянии поставляется по соглашению изготовителя с потребителем. Электрическое сопротивление манганиновой проволоки в зависимости от температуры в пределах от 10 до 40 °С вычисляют по формуле

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2],$$

где R_{20} — сопротивление образца при 20 °С, Ом; t — температура, °С; α и β — температурные коэффициенты, значения которых для отожженных образцов должны находиться в пределах:

Марка сплава	α, 10^{-6} °С$^{-1}$	β, 10^{-6} °С$^{-2}$
МНМцАЖ3-12-0,3-03	От —2 до +10	От —1,5 до 0,5
МНМц3-12	От +10 до +25	От —1,5 до 0,5

Электрическое сопротивление 1 м манганиновой проволоки различных диаметров приведено в табл. 15.21 (граничные значения сопротивления для каждого размера проволоки определены с учетом предельных отклонений по диаметру и удельному электрическому сопротивлению). Некоторые свойства проволоки и полос, изготовленных из манганина, даны в табл. 15.22. Из манганина марки МНМцАЖ3-12-0,25-0,2 производится фольга толщиной 0,010 мм и шириной 270 мм для изготовления измерительных резисторов высокой точности (ТУ 48-21-229-72).

Широко распространен в электротехнике медно-никелевый сплав константан, выпускаемый в соответствии с ГОСТ 492-73 под маркой МНМц40-1,5, состав которого приведен в табл. 15.19. Входящий в состав сплава марганец является хорошим раскислителем, он же нейтрализует вредное действие серы, благоприятно влияет на технологические свойства. Константан обладает многими положительными качествами. Само название подчеркивает практическую независимость его удельного электрического сопротивления от температуры. Температурный коэффициент удельного сопротивления сплава по абсолютному значению может быть $2 \cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$ и даже меньше. Константан сочетает высокую механическую прочность с пластичностью, что позволяет получать из него тончайшую проволоку, фольгу, ленты, полосы. По нагревостойкости константан превосходит манганин, и это дает возможность применять его в реостатах и нагревательных элементах, работающих при температуре до 500°С, однако широкое применение константана для таких целей ограничено большим содержанием в составе сплава дорогого и дефицитного никеля. Некоторые свойства константана приведены в табл. 15.20. Существенно отличает константан от манганина высокое значение удельной термо-ЭДС в паре с медью, что не по-

Таблица 15.20. **Физические и технологические свойства медно-никелевых сплавов**

Параметры	Манганины МНМц3-12 и МНМцАЖ3-12-0,3-0,3	Константан МНМц40-1,5	Нейзильбер МНц15-20
Плотность (20 °С), кг·м$^{-3}$	8400	8900	8700
Температура плавления, °С	960	1260	1080
Максимальная рабочая температура, °С	60 (в приборах)	500	200—250
Удельное электрическое сопротивление (20 °С), мкОм·м	0,42—0,53	0,45—0,52	0,30—0,32
Температурный коэффициент удельного сопротивления, °С$^{-1}$	$(-2 \div +25) \cdot 10^{-6}$ в диапазоне 10—40 °С	$(-2 \div +6) \cdot 10^{-5}$ в диапазоне 20—100 °С	$36 \cdot 10^{-5}$
Температурный коэффициент линейного расширения (20—100 °С), °С$^{-1}$	$18 \cdot 10^{-6}$	$14{,}4 \cdot 10^{-6}$	$16{,}6 \cdot 10^{-6}$
Удельная термо-ЭДС в паре с медью (в диапазоне 0—100 °С), мкВ/°С	0,9—1	42,8	14,4
Удельная термо-ЭДС в паре с железом (в диапазоне 0—100 °С), мкВ/°С	—	54	—

Таблица 15.21. **Электрическое сопротивление манганиновой проволоки (ГОСТ 10155-75)**

Номинальный диаметр проволоки, мм	Сопротивление 1 м проволоки, Ом		Номинальный диаметр проволоки, мм	Сопротивление 1 м проволоки, Ом	
	мягкой	твердой		мягкой	твердой
0,020	—	1370,0—2340,0	0,60	1,49—2,00	1,52—2,04
0,025	—	876,0—1390,0	0,63	1,35—1,84	1,38—1,88
0,030	—	608,0—927,0	0,65	1,27—1,73	1,30—1,76
0,040	—	342,0—551,0	0,70	1,09—1,48	1,12—1,51
0,050	214,0—327,0	219,0—333,0	0,75	0,951—1,28	0,974—1,30
0,060	149,0—219,0	152,0—223,0	0,80	0,836—1,12	0,856—1,14
0,070	109,0—157,0	112,0—160,0	0,85	0,740—0,986	0,758—1,00
0,080	83,6—118,0	85,6—120,0	0,90	0,660—0,876	0,676—0,892
0,090	66,0—91,7	67,6—93,6	1,00	0,536—0,719	0,548—0,733
0,10	53,5—87,6	54,8—89,2	1,10	0,443—0,590	0,453—0,601
0,12	37,1—57,9	38,1—59,0	1,20	0,371—0,493	0,381—0,502
0,14	27,3—41,2	27,9—41,9	1,30	0,317—0,418	0,324—0,426
0,15	23,8—35,4	24,4—36,0	1,40	0,273—0,358	0,279—0,365
0,16	20,9—33,8	21,4—34,5	1,50	0,238—0,311	0,244—0,317
0,18	16,5—25,4	16,9—26,4	1,60	0,209—0,272	0,214—0,278
0,20	13,4—20,5	13,7—20,9	1,70	0,185—0,240	0,189—0,245
0,22	11,1—16,6	11,3—16,9	1,80	0,165—0,214	0,169—0,218
0,25	8,58—12,5	8,76—12,8	1,90	0,148—0,192	0,152—0,195
0,28	6,82—9,59	6,98—9,95	2,00	0,134—0,176	0,137—0,180
0,30	6,94—8,45	6,09—8,62	2,20	0,111—0,145	0,113—0,147
0,35	4,37—6,27	4,47—6,39	2,50	0,0856—0,111	0,0876—0,113
0,36	4,12—5,91	4,23—6,02	2,80	0,0683—0,0882	0,0699—0,0899
0,38	3,71—5,26	3,79—5,36	3,00	0,0595—0,0766	0,0609—0,0781
0,40	3,35—4,71	3,42—4,81	3,60	0,0413—0,0534	0,0423—0,0545
0,45	2,64—3,67	2,71—3,74	4,00	0,0335—0,0431	0,0343—0,0439
0,50	2,14—2,94	2,19—2,99	4,50	0,0265—0,0339	0,0271—0,0346
0,55	1,77—2,41	1,81—2,46	5,00	0,0214—0,0273	0,0219—0,0279
0,56	1,71—2,32	1,75—2,36	6,00	0,0149—0,0189	0,0152—0,0192

Таблица 15.22. **Свойства некоторых полуфабрикатов, изготовленных из манганина**

ГОСТ, ТУ	Марка сплава и вид изделия	Состояние материала	Удельное электрическое сопротивление при 20° С, мкОм·м	Температурный коэффициент удельного сопротивления, $°C^{-1}$	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение %
ГОСТ 10155-75	МНМцАЖ3-12-0,3-0,3 и МНМц3-12, проволока диаметром:					
	0,05—0,09 мм	Мягкий	0,47±0,05	$(-2 \div +10)\cdot 10^{-6}$ для МНМцАЖ3-12-0,3-0,3;	—	≥10
	0,10—6,0 мм	Мягкий	0,47±0,05	$(-2 \div +10)\cdot 10^{-6}$ для МНМцАЖ3-12-0,3-0,3;	—	≥15
	МНМц3-12, проволока диаметром 0,05—6,0 мм	Твердый	0,48±0,05	$(10-25)\cdot 10^{-6}$ для МНМц3-12	—	≤9
ТУ 48-21-219-72	МНМц3-12	Мягкий	0,42—0,50	$(-6 \div +6)\cdot 10^{-5}$	360—500	≥25
	МНМцАЖ3-12-0,3-0,3, полоса толщиной 0,5—2,5 мм и шириной 50—300 мм	»	—	$(-1,5 \div +1,5)\cdot 10^{-5}$	—	—

зволяет применять константан в высокоточных электроизмерительных системах и приборах. Благодаря значительной термо-ЭДС в паре с медью и железом константан нашел применение для изготовления термопар. Термопары медь — константан используются для измерения температур до 300—350 °С, а железо — константан — до 600 °С (при кратковременном нагреве до 800 °С).

В соответствии с ГОСТ 5307-77 выпускается проволока константановая неизолированная круглого сечения, применяемая для электротехнических целей и предназначенная для работы при температуре не выше 500 °С. Проволоку диаметром от 0,02 до 5,00 мм изготовляют из константана марки МНМц40-1,5. По состоянию металла проволока должна быть: диаметром 0,09 мм и менее — твердой, диаметром свыше 0,09 мм — твердой или мягкой. Электрическое сопротивление 1 м константановой проволоки различных диаметров приведено в табл. 15.23. Некоторые свойства проволоки и других полуфабрикатов, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. 15.24. После нагревания константановой проволоки до 900 °С в течение 2—3 с на ее поверхности образуется пленка окислов, обладающая электроизоляционными свойствами. Про-

Таблица 15.23. **Электрическое сопротивление константановой проволоки (ГОСТ 5307-77)**

Диаметр проволоки, мм	Электрическое сопротивление 1 м проволоки, Ом		Диаметр проволоки, мм	Электрическое сопротивление 1 м проволоки Ом	
	мягкой при удельном сопротивлении 0,45—0,48 мкОм·м	твердой при удельном сопротивлении 0,46—0,52 мкОм·м		мягкой при удельном сопротивлении 0,45—0,48 мкОм·м	твердой при удельном сопротивлении 0,46—0,52 мк Ом·м
0,020	—	1465—2290,75	0,60	1,59—1,82	1,63—1,97
0,025	—	936,86—1253,01	0,65	1,36—1,59	1,39—1,72
0,030	—	650,64—844,16	0,70	1,17—1,36	1,20—1,48
0,040	—	365,95—458,55	0,75	1,02—1,18	1,04—1,28
0,050	—	234,36—312,88	0,80	0,895—1,03	0,915—1,12
0,060	—	162,72—211,12	0,85	0,793—0,909	0,811—0,985
0,070	—	119,54—156,72	0,90	0,707—0,807	0,723—0,875
0,080	—	91,51—117,70	1,00	0,573—0,663	0,586—0,718
0,090	—	72,30—91,68	1,10	0,474—0,544	0,484—0,589
0,10	57,33—95,48	58,60—103,58	1,20	0,398—0,454	0,407—0,492
0,12	39,79—61,15	40,67—66,24	1,30	0,339—0,385	0,347—0,417
0,14	29,24—42,44	29,89—45,98	1,40	0,292—0,330	0,299—0,358
0,15	25,47—36,17	26,03—39,19	1,50	0,255—0,287	0,260—0,311
0,16	22,38—31,19	22,87—33,79	1,60	0,224—0,251	0,229—0,272
0,18	17,68—23,87	18,08—25,86	1,70	0,198—0,222	0,203—0,240
0,20	14,32—18,86	14,64—20,43	1,80	0,177—0,197	0,181—0,214
0,22	11,84—15,28	12,10—16,55	1,90	0,158—0,177	0,162—0,191
0,25	9,17—11,55	9,37—12,52	2,00	0,143—0,162	0,146—0,176
0,28	7,31—9,04	7,47—9,80	2,25	0,113—0,127	0,116—0,138
0,30	6,37—7,80	6,51—8,44	2,50	0,0917—0,103	0,0937—0,111
0,33	5,26—6,37	6,38—6,89	2,75	0,076—0,084	0,077—0,092
0,35	4,68—5,61	4,78—6,08	3,00	0,064—0,071	0,065—0,077
0,38	3,97—4,72	4,06—5,11	3,50	0,047—0,052	0,048—0,057
0,40	3,58—4,23	3,66—4,59	4,00	0,036—0,040	0,037—0,043
0,45	2,83—3,31	2,89—3,53	4,50	0,028—0,031	0,029—0,034
0,50	2,29—2,65	2,34—2,87	5,00	0,023—0,025	0,023—0,027
0,55	1,89—2,18	1,94—2,36			

Таблица 15.24. **Свойства полуфабрикатов, изготовленных из константана и нейзильбера**

ГОСТ, ТУ	Марка сплава и вид изделия	Состояние материала	Удельное электрическое сопротивление при 20°С, мкОм·м	Температурный коэффициент удельного сопротивления, $°C^{-1}$	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
ГОСТ 5307-77	МНМц40-1,5, проволока диаметром:					
	0,020—5,00 мм	Твердый	0,490±0,030	$(-2 \div +6)\cdot 10^{-5}$	≥650	—
	0,10—0,45 мм	Мягкий	0,465±0,015	В диапазоне 20—100°С	450—660	15
	0,50—5,00 мм	Мягкий	0,465±0,015	В диапазоне 20—100°С	450—650	20
ГОСТ 1791-67	МНМц40-1,5, проволока для удлиняющих проводов к термопарам диаметром:					
	0,2 и 0,3 мм	Мягкий	0,465±0,015	—	≥400	10
	0,4—2,5 мм	Мягкий	0,465±0,015	—	≥400	15
ГОСТ 5189-75	МНМц40-1,5, ленты шириной от 6 до 300 мм и толщиной 0,1—2 мм	Мягкий	0,45—0,51	—	400—600	—
		Твердый	0,45—0,51	—	≥650	—
ТУ 48-21-213-72	МНМц40-1,5, полосы шириной 40 мм и кратной ей:					
	толщиной 2,0 и 2,5 мм	Мягкий	0,45—0,51	—	400—600	—
	толщиной 2,0 мм	Твердый	0,45—0,51	—	≥650	—
ТУ 48-21-144-72	МНМцЖ40-1,4-0,45 и МНМцЖ40-1,25-0,55, фольга тензорезистивная:					
	ширина 60—80 мм, толщина 0,003 мм	Твердый	0,46—0,51	$(-20 \div -30)\cdot 10^{-6}$ для МНМцЖ40-1,4-0,45; $(-3 \div -13)\cdot 10^{-6}$ для МНМцЖ40-1,25-0,55	—	—
	ширина 80—100 мм, толщина 0,005—0,01 мм	Твердый	0,46—0,51	$(-20 \div -30)\cdot 10^{-6}$ для МНМцЖ40-1,4-0,45; $(-3 \div -13)\cdot 10^{-6}$ для МНМцЖ40-1,25-0,55	—	—
ГОСТ 5220-78	МНЦ15-20, проволока диаметром:					
	0,1—0,20	Мягкий	—	—	>350	15
	0,25—0,50	Мягкий	—	—	>350	20
	0,60—1,00	Мягкий	—	—	>350	25
	1,10—5,0	Мягкий	—	—	>350	30
	0,6—1,00	Полутвердый	—	—	>450	3
	1,1—5,0	Полутвердый	—	—	>450	5
	0,1—2,00	Твердый	—	—	700—1100	—
	2,2—5,0	Твердый	—	—	≥550	—

Продолжение табл. 15.24

ГОСТ, ТУ	Марка сплава и вид изделия	Состояние материала	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, мкОм·м	Температурный коэффициент удельного сопротивления, $°C^{-1}$	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
ГОСТ 5063-73	МНЦ15-20, полосы шириной 40—500 мм, толщина 0,5—10 мм (особо твердые — до 4 мм)	Мягкий Твердый Особотвердый	—	—	≥350 ≥550 ≥650	35 1 1

волоку с такой изоляцией можно навивать плотно виток к витку, если напряжение между соседними витками не превышает 1 В.

Для изготовления реостатов, контактных пружин и других электротехнических целей находит применение медно-никелевый сплав нейзильбер марки МНЦ15-20, химический состав которого в соответствии с ГОСТ 492-73 приведен в табл. 15.19. Благодаря значительному содержанию цинка нейзильбер дешевле константана, но существенно уступает ему в свойствах — имеет меньшее удельное электрическое сопротивление и больший температурный коэффициент удельного сопротивления. Допустимая рабочая температура нейзильбера 200—250 °С, так как при более высоких температурах вследствие диффузии цинка к границам зерен сплава изделие становится хрупким. Свойства нейзильбера приведены в табл. 15.20. Нейзильбер, внешне напоминающий серебро (чем и объясняется его название), отличается высокой механической прочностью, пластичностью и коррозионной стойкостью. После холодной деформации сплав приобретает достаточную упругость. Свойства проволоки и прутков из нейзильбера, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. 15.24. В соответствии с ТУ 48-08-428-71 из нейзильбера производятся ленты твердые, повышенной точности, толщиной 0,13 мм для изготовления контактных пружин.

15.8. ЖАРОСТОЙКИЕ СПЛАВЫ ВЫСОКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Жаростойкие сплавы высокого сопротивления применяются для изготовления электронагревательных элементов, длительно работающих в воздушной среде при температурах 1000 °С и выше, а также проволочных или ленточных резисторов. Помимо высокого удельного электрического сопротивления и его малого температурного коэффициента эти материалы отличаются высокой жаростойкостью — способностью противостоять химическому разрушению поверхности под воздействием воздуха или иных газообразных сред при высоких температурах. Они имеют удовлетворительные технологические свойства, позволяющие получать проволоку, ленты, прутки и другие полуфабрикаты, обладают свариваемостью, а также имеют достаточную жаропрочность — способность выдерживать механические нагрузки без существенных деформаций, не разрушаясь при высоких температурах. Желательно, чтобы сплавы, предназначенные для изготовления изделий массового производства, были дешевыми и не содержали дефицитных компонентов.

Жаростойкость сплава обеспечивается устойчивостью в широком диапазоне температур образующихся на поверхности окислов и других продуктов газовой коррозии, а также плотностью пленки окислов, защищающей внутренние слои материала от дальнейшего окисления. Сплошной оксидный слой будет образовываться в том случае, если объем окисла будет превосходить объем вошедшего в состав окисла металла. Через окисную пленку не должна происходить диффузия кислорода, а также диффузия металла в пленку, что равносильно безостановочному окислению глубинных слоев сплава. Металлами, окислы которых обладают такими свойствами, являются никель, хром и алюминий. Поэтому они входят в состав распространенных хромоникелевых и хромоалюминиевых жаростойких сплавов высокого сопротивления. Марки и химический состав жаростойких и жаропрочных сплавов высокого сопротивления, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. 15.25. Для обозначения марок сплавов применяются композиции из букв и чисел. Буквы обозначают названия наиболее характерных элементов, входящих в состав сплава (Н — никель, Х — хром, Ю — алюминий, Т — титан и т. п.), а число после буквы — примерное содержание данного компонента в процентах по массе. Дополнительные буквы в конце марки характеризуют повышенное качество марок сплава, близких по составу.

Хромоникелевые сплавы (ранее нихромы) сочетают высокую жаростойкость с хорошей технологичностью, что позволяет получать из них тонкую проволоку и ленту, причем сплавы с ограниченным содержанием хрома (15—20 %) более технологичны. Преимуществом хромоникелевых сплавов перед хромоалюминиевыми является более высокая жаропрочность, недостатком — значительное содержание в них дефицитного никеля (55—80 %). С целью удешевления за счет частичной замены никеля в состав хромоникелевых сплавов вводят до 25—50 % железа, что снижает жаростойкость этих сплавов, называемых иногда ферронихромами.

Хромоалюминиевые сплавы, практически не содержащие никеля, намного дешевле нихромов и отличаются от них повышенной жаростойкостью, более высоким удельным электрическим сопротивлением (до 2 мкОм×м и более) и пониженным температурным коэффициентом удельного сопротивления. Однако они более тверды и хрупки, чем нихро-

Таблица 15.25. **Марки и химический состав жаростойких и жаропрочных сплавов высокого электрического сопротивления**

ГОСТ	Марка сплава	Химический состав, %									Прочие
		Углерод	Марганец	Si	Cr	Ni	Al	Fe	S	P	
		не более							не более		
10994-79	Х13Ю4	0,15	0,7	≤1,0	12,0—15,0	≤0,6	3,5—5,5	Ост.	0,025	0,035	—
	Х23Ю5	0,06	0,5	≤0,7	21,5—24,5	≤0,6	4,5—5,5	»	0,020	0,025	—
	Х23Ю5Т	0,05	0,3	≤0,6	21,5—23,5	≤0,6	4,6—5,3	»	0,015	0,020	—
	Х27Ю5Т	0,05	0,3	≤0,6	26,0—28,0	≤0,6	5,0—5,8	»	0,015	0,020	—
	Х25Н20	0,15	2,0	≤1,0	24,0—27,0	17,0—20,0	—	»	0,020	0,030	—
	Х15Н60	0,15	1,5	0,4—1,5	15,0—18,0	55,0—61,0	≤0,2	»	0,020	0,030	—
	Х15Н60-Н	0,10	0,6	1,0—1,5	15,0—18,0	55,0—61,0	≤0,2	»	0,020	0,030	—
	Х20Н80	0,15	0,7	0,4—1,5	20,0—23,0	Ост.	≤0,2	≤1,5	0,020	0,030	—
	Х20Н80-Н	0,10	0,6	1,0—1,5	20,0—23,0	»	≤0,2	≤1,2	0,020	0,030	—
5632-72	ХН60Ю	0,10	0,3	≤0,8	15,0—18,0	55,0—58,0	2,6—3,5	Ост.	0,020	0,020	Барий ≥0,10; церий ≥ 0,03
	ХН70Ю	0,10	0,3	≤0,8	26,0—29,0	Ост.	2,8—3,5	≤1,0	0,012	0,015	Барий ≥ 1,10; церий ≥0,03
	ХН77ТЮР	0,07	0,3	≤0,6	19,0—22,0	»	0,6—1,0	≤4,0	0,007	0,015	Титан 2,4—2,8; бор ≥ 0,01; церий ≥0,02

Таблица 15.26. **Основные свойства и области применения жаростойких сплавов высокого сопротивления**

Марка сплава	Характеристика окалиностойкости и жаропрочности	Преимущественные области применения
Х13Ю4, Х15Ю5	Окалиностойки в окислительной атмосфере и в атмосфере, содержащей серу и сернистые соединения; склонны к провисанию при высоких температурах	Проволока и лента для реостатов, нагревательных элементов, бытовых приборов и аппаратов
Х23Ю5Т		Проволока и лента для промышленных и лабораторных печей, бытовых приборов и аппаратов, реостатов и др.
Х27Ю5Т		Проволока и лента для высокотемпературных промышленных и лабораторных печей
Х25Н20	Окалиностойки в окислительной атмосфере, водороде, вакууме; неустойчивы в атмосфере, содержащей серу и сернистые соединения; более жаропрочны, чем хромоалюминиевые сплавы	Проволока для промышленных и бытовых печей, бытовых приборов
Х15Н60		Проволока и лента для промышленных электрических аппаратов теплового действия, реостатов и бытовых приборов
Х15Н60-Н		Проволока и лента для промышленных и лабораторных печей, электрических аппаратов теплового действия и бытовых приборов
Х20Н80		Проволока и лента для промышленых электрических аппаратов теплового действия, реостатов, резисторов, микропроводов и бытовых приборов
Х20Н80-Н		Проволока и лента для промышленных и лабораторных печей, электрических аппаратов теплового действия и бытовых приборов

Марка сплава	Рекомендуемая максимальная рабочая температура нагревательного элемента, °С, в зависимости от диаметра или толщины материала, мм				
	0,2	0,4	1,0	3,0	6,0 и более
Х13Ю4	700	800	850	900	950
Х15Ю5	750	850	900	950	1000
Х23Ю5	950	1025	1100	1150	1200
Х23Ю5Т	950	1075	1225	1350	1400
Х27Ю5Т	950	1075	1200	1300	1350
Х15Н60-Н	900	950	1000	1075	1125
Х20Н80-Н	950	1000	1100	1150	1200
ХН70Ю	950	1000	1100	1175	1200

Таблица 15.27. **Основные свойства жаропрочных сплавов высокого сопротивления (ГОСТ 5632-72)**

Марка сплава	Удельное сопротивление при 20 °С, мкОм·м	Рабочая температура, °С	Окружающая среда
ХН60Ю	1,209	1100—1200	Воздух, вакуум, защитные среды в отсутствие сернистых соединений
ХН70Ю	1,338	1100—1200	
ХН77ТЮР	1,270	1000—1100	Вакуум, защитные среды в отсутствие сернистых соединений

Таблица 15.28. **Физические свойства жаростойких сплавов с высоким электрическим сопротивлением**

Параметры	Х13Ю4	Х15Ю5	Х23Ю5	Х23Ю5Т	Х27Ю5Т	Х15Н60, Х15Н60-Н	Х20Н80, Х20Н80-Н	ХН70Ю
Плотность, кг/м³	7300	7280	7250	7210	7190	8200	8400	7900
Температура плавления, °С	1500	1500	1500	1500	1500	1390	1400	1390
Структура	Ферритная					Аустенитная		
Магнитность	Магнитные					Немагнитные		
Число Бринелля	140—200	150—200	180—250	200—250	200—250	140—150	140—150	—
ТК линейного расширения, 10^{-6} °С$^{-1}$, в интервале 20—1000 °С	15	16	15	15	15	17	18	21
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	12,6	16,8	12,6
Темплоемкость, 10^{-3}Дж/(кг·°С)	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,504	0,462

Таблица 15.29. **Удельное сопротивление жаростойких сплавов в мягком состоянии**

Марка	Удельное сопротивление при 20 °С, мкОм·м	Марка	Удельное сопротивление при 20 °С, мкОм·м
Х13Ю4	1,18—1,34	Х25Н20	0,83—0,96
Х15Ю5	1,24—1,34	Х15Н60,	1,06—1,17
Х23Ю5	1,30—1,40	Х15Н60-Н	
Х23Ю5Т	1,34—1,45	Х20Н80,	1,04—1,17
Х27Ю5Т	1,37—1,47	Х20Н80-Н	
		ХН70Ю	1,25—1,35

Таблица 15.30. **Температурный коэффициент удельного сопротивления некоторых жаростойких сплавов, °С$^{-1}$ (ГОСТ 12766.1-77)**

Марка сплава	Интервал температур °С		
	от —60 до +20	от +20 до 60	от 60 до 100
Х23Ю5	$1{,}4\cdot10^{-5}$	$1{,}3\cdot10^{-5}$	$2{,}0\cdot10^{-5}$
Х15Н60	$1{,}4\cdot10^{-4}$	$1{,}5\cdot10^{-4}$	$1{,}6\cdot10^{-4}$
Х20Н80	$1{,}0\cdot10^{-4}$	$0{,}9\cdot10^{-4}$	$0{,}9\cdot10^{-4}$

Таблица 15.31. **Механические свойства жаростойких и жаропрочных сплавов при кратковременных испытаниях на разрыв**

Марка сплава	Температура испытаний, °С	Предел прочности при растяжении, Мпа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
Х23Ю5, Х23Ю5Т	20	645	540	23	72
	400	603	431	16	53

Продолжение табл. 15.31

Марка сплава	Температура испытаний, °С	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
Х23Ю5, Х23Ю5Т	600	372	352	30	79
	800	117	—	58	94
	1000	17	—	122	96
	1200	9	—	—	—
Х27Ю5Т	20	663	534	16	—
	200	660	425	24	63
	400	605	357	26	53
	600	375	354	33	72
	800	87	—	76	97
	1000	13	—	127	—
	1200	9	—	118	—
Х15Н60, Х15Н60-Н	20	645	264	32	60
	600	402	254	23	40
	700	284	226	30	52
	800	166	127	33	51
	900	108	—	24	45
	1000	59	—	36	44
	1100	38	—	20	34
	1200	28	—	17	33
Х20Н80, Х20Н80-Н	20	656	—	45,4	61
	700	431	—	40,0	40
	800	215	—	70,1	73
	900	92	—	55,0	82
	1000	71	—	70,0	63
	1100	35	—	130,0	93
	1150	27	—	110,0	97
	1200	22	—	101,8	98
ХН70Ю	20	813	—	38	—
	700	540	—	3	—
	800	392	—	14	—
	900	135	—	52	—
	1000	79	—	58	—
	1100	43	—	82	—
	1200	32	—	143	—

Таблица 15.32. **Поправочные коэффициенты для расчета электрического сопротивления жаростойких и жаропрочных сплавов в зависимости от температуры**

Марка сплава	Температура нагрева, °С														
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Х15Н60	1,000	1,013	1,029	1,046	1,062	1,074	1,083	—	—	—	—	—	—	—	—
Х15Н60-Н	1,000	1,013	1,029	1,046	1,062	1,074	1,083	1,083	1,089	1,097	1,105	1,114	—	—	—
Х20Н80	1,000	1,006	1,016	1,024	1,031	1,035	1,026	1,019	1,017	1,021	1,028	1,038	—	—	—
Х20Н80-Н	1,000	1,003	1,015	1,022	1,029	1,032	1,023	1,016	1,015	1,017	1,025	1,033	1,040	—	—
Х13Ю4, Х15Ю5	1,000	1,004	1,013	1,025	1,041	1,062	1,090	1,114	1,126	1,135	1,44	—	—	—	—
Х23Ю5, Х23Ю5Т	1,000	1,002	1,007	1,013	1,022	1,036	1,056	1,063	1,067	1,072	1,076	1,079	1,080	1,083	1,086
Х27Ю5Т	1,000	1,002	1,005	1,010	1,015	1,025	1,030	1,033	1,035	1,040	1,040	1,041	1,043	1,045	—
ХН60Ю	1,000	—	0,984	1,000	1,022	1,040	1,021	1,012	1,008	1,013	1,015	1,031	—	—	—
ХН70Ю	1,000	1,004	—	—	—	1,051	1,052	1,035	1,015	1,015	1,016	1,021	1,028	—	—

Таблица 15.33. **Предельные размеры проволоки, прутков и ленты из жаростойких сплавов**

Марка сплава	Проволока холоднотянутая	Прутки	Лента холоднокатаная	
	Диаметр, мм		Толщина, мм	Ширина, мм
Х13Ю4, Х15Ю5	0,2—7,5	13—30	0,2—3,2	6—80
Х23Ю5, Х23Ю5Т	0,3—7,5	13—25	0,2—3,2	6—80
Х27Ю5Т	0,5—5,5	13—25	0,2—3,2	6—80
Х25Н20	0,2—7,5	13—25	—	—
Х15Н60	0,3—7,5	—	0,1—3,2	6—250
Х15Н60-Н	0,1—7,5	13—16	0,1—3,2	6—250
Х20Н80	0,4—7,5	13—16	0,1—3,2	6—250
Х20Н80-Н	0,1—7,5	13—16	0,1—3,2	6—250
ХН70Ю	1,0—7,0	13—25	—	—

Примечания: 1. Проволока изготовляется по ГОСТ 12766.1-77 в мягком состоянии.

2. Лента изготовляется по ГОСТ 12766.2-77 толщиной 0,2 мм и более в мягком состоянии, толщиной менее 0,2 мм — в нагартованном состоянии.

3. По ГОСТ 12766.3-77 изготовляется калиброванная проволока диаметром 8—10 мм в мотках из всех сплавов, кроме ХН70Ю. Поставляется в мягком состоянии.

4. По ГОСТ 12766.4-77 из всех сплавов изготовляется сортовой прокат диаметром 6—12 мм в мотках, поставляемый в мягком состоянии. Из сплавов Х23Ю5, Х23Ю5Т и Х27Ю5Т изготовляется квадрат со стороной 5 мм в мотках, поставляемый в мягком состоянии. Прутки поставляются без термообработки.

мы, и поэтому менее технологичны: хуже обрабатываются деформацией, особенно в холодном состоянии, что не позволяет изготовлять из них такой тонкой проволоки и ленты, как из нихромов. Сплав с повышенным содержанием железа (Х13Ю4), называвшийся ранее фехралем, более технологичен, чем сплавы с более высоким содержанием хрома (23—27 %), называвшиеся хромалями: с увеличением добавок хрома и алюминия растут жаростойкость и одновременно твердость и хрупкость сплава. Менее жаростойкий из-за высокого содержания железа фехраль имеет более высокий температурный коэффициент удельного сопротивления ($1{,}5 \cdot 10^{-4}$ °С$^{-1}$), чем хромали Х23Ю5, Х23Ю5Т, Х27Ю5Т.

Электрические, физические и механические свойства, рабочие температуры, характеристика окалиностойкости (жаростойкости) и жаропрочности, а также сведения об областях применения жаростойких и жаропрочных сплавов высокого сопротивления приведены в табл. 15.26—15.31. Ввиду сложного характера зависимости электрического сопротивления жаростойких сплавов от температуры в широком диапазоне ее изменения для расчетов рекомендуется пользоваться поправочными коэффициентами, приведенными в табл. 15.32. Поправочный коэффициент представляет собой отношение электрического сопротивления сплава при температуре нагрева к его сопротивлению при 20 °С.

В табл. 15.33 указаны предельные размеры проволоки, прутков и ленты, изготовляемых из жаростойких сплавов. Диаметры холоднотянутой проволоки должны соответствовать ГОСТ 2771-81 (группам размеров II и III), диаметры горячекатаной проволоки и прутков — ГОСТ 2590-71, а размеры плющеной ленты — ГОСТ 10234-77.

В соответствии с ГОСТ 8803-77 поставляется в отожженном состоянии тончайшая (диаметром свыше 0,09 мм до 0,4 мм) и наитончайшая (от 0,009 до 0,09 мм) нихромовая проволока. Из сплава Х20Н80-ВИ изготовляется проволока с номинальным диаметром от 0,009 до 0,4 мм; из сплава Н80ХЮД-ВИ — диаметром от 0,02 до 0,4 мм, из сплава ЭП277-ВИ — диаметром от 0,03 до 0,06 мм, а из сплавов Х20Н80 и Х15Н60 — диаметром от 0,1 до 0,4 мм.

15.9. СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ И КРИОПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сверхпроводниковыми материалами называются материалы, обладающие свойством сверхпроводимости (см. § 3.3).

Для использования в энергетике, электромеханике и в других целях представляют интерес сверхпроводниковые материалы с высокими критическими параметрами, относящиеся по своей природе к сверхпроводникам III рода. Для сверхпроводников III рода, или так называемых неидеальных сверхпроводников II рода, характерно наличие большого количества дефектов структуры (физических и химических неоднородностей, превышающих атомный размер), создаваемых специальной технологией изготовления. В результате эти материалы могут без потерь пропускать постоянные токи высокой плотности в присутствии сильного

Таблица 15.34

Марка сплава	$T_{кр}$, К	$B_{кр}$ при 4,2 К, Тл	Критическая плотность тока при 3,5 Тл, А/см²	Технические условия
65БТ	9,7	7,5—9	(5—10)×$\times 10^4$	ЧМТУ 1-29-66
50БТ	8,5	10,5—12	(5—8)·10^4	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 1458-67
35БТ	8,0	10—11	(5—10)×$\times 10^4$	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 1489-69

поперечного магнитного поля. Выпускаемые промышленностью сверхпроводниковые материалы такой природы являются либо сплавами типа твердых растворов, либо интерметаллическими соединениями. Сплавы отличаются пластичностью и поэтому легко перерабатываются в изделия, хорошо деформируясь в горячем и холодном состояниях. Интерметаллические соединения имеют более высокие критические параметры, но хрупки.

К двухкомпонентным сплавам системы ниобий — цирконий относится отечественный сплав марки НЦ-50, содержащий 50 % циркония. Его критическая температура 10,5 К, при 4,2 К критическая магнитная индукция составляет 8,7 Тл, а критическая плотность тока $1 \cdot 10^5$ А/см² (при 5 Тл). В настоящее время ниобий-циркониевая проволока вытесняется проволокой из ниобий-титановых сплавов, имеющих более высокие свойства. Сплав марки НТ-50, содержащий 50 % титана, имеет критическую температуру 9,5 К. При 4,2 К его критическая магнитная индукция составляет 11 Тл, а критические плотности тока $3 \cdot 10^5$ и $1 \cdot 10^4$ А/см² (при индукциях 5 и 10 Тл соответственно). Для создания магнитных систем также применяются трехкомпонентные сплавы системы ниобий — титан — цирконий. Отечественные сплавы этого типа имеют марки 35БТ, 50БТ и 65БТ, которые содержат по массе 35, 50 и 65 % ниобия и от 25 до 64 % титана (остальные — цирконий и другие компоненты). Нормируемые свойства этих сплавов приведены в табл. 15.34.

Сплав 65БТ отличается наибольшей критической температурой и плотностью тока. Сплав 50БТ обладает наивысшей критической магнитной индукцией. Сплав 35БТ отличается высоким удельным электрическим сопротивлением в нормальном состоянии (1,18—1,25 мкОм·м при 300 К), высокой пластичностью и удельной ударной вязкостью при криогенных температурах (20—77 К).

Из числа интерметаллических соединений широкое промышленное применение нашел станнид ниобия (Nb_3Sn), имеющий критическую температуру 18,2 К. При 4,2 К его критическая магнитная индукция 24,5 Тл, а критические плотности тока составляют (1,5—2)×$\times 10^6$ А/см² при $B=5$ Тл, $1 \cdot 10^6$ А/см² при $B=10$ Тл, (0,7—1)·10^5 А/см² при $B=15$ Тл и (3—5)·10^4 А/см² при $B=20$ Тл. На основе этого материала созданы магнитные системы с весьма высокой магнитной индукцией. Хотя станнид ниобия очень хрупок, на его основе по специальной технологии производятся плоские и скрученные сверхпроводящие провода.

Криопроводниковыми материалами называются металлы, применяемые при глубоком охлаждении (при криогенных температурах), когда они приобретают высокую электрическую проводимость, хотя и не переходят в сверхпроводящее состояние (если даже относятся к сверхпроводникам). Эти материалы используются, в частности, для изготовления токопроводящих жил криопроводящих проводов и кабелей, работающих при температурах жидких водорода (20,4 К), неона (27,3 К), азота (77,4 К). При сильном охлаждении, когда составляющая удельного электрического сопротивления металла, обусловленная рассеянием электронов тепловыми колебаниями решетки, пренебрежимо мала, остаточное удельное сопротивление, не зависящее от температуры, определяется примесями и физическими дефектами решетки (см. рис. 15.1). Поэтому в качестве криопроводника целесообразно применять хорошо отожженный металл высокой чистоты. Мерой качества криопроводникового материала служит относительное сопротивление R_T, определяемое как отношение удельного сопротивления металла при 20 °С (293 К) к удельному сопротивлению при заданной криогенной температуре. У хороших криопроводников значение R_T достигает нескольких тысяч. Применение таких материалов позволяет значительно уменьшить габариты и массу электротехнических устройств и увеличить в то же время их КПД.

На рис. 15.2 приведена температурная зависимость удельного электрического сопротивления особо чистых алюминия и меди, а также бериллия промышленной чистоты с содержанием примесей около 0,1 %. Наилучшим криопроводником для работы при температуре жидкого водорода является алюминий, удельное электрическое сопротивление которого при 20 К является минимальным по сравнению с другими металлами. Кроме того, сумма потерь в криопроводнике и потерь на охлаждение проходит через четкий минимум как раз при 20 К. В качестве криопроводникового

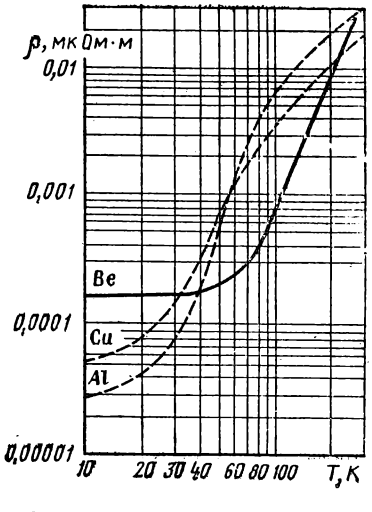


Рис. 15.2. Зависимость удельного электрического сопротивления алюминия, меди и бериллия от температуры

материала нашел применение алюминий особой и высокой чистоты марок А999 и А995.

У алюминия марки А999, содержащего всего 0,001 % примесей, при охлаждении до 20 К удельное электрическое сопротивление достигает остаточного сопротивления и при последующем снижении температуры практически не изменяется. Согласно ГОСТ 11069-74 остаточное удельное сопротивление алюминия марки А999 не должно превышать 4×10^{-6} мкОм·м при температуре жидкого гелия. Практически этот показатель может составить $(1—2)\cdot10^{-6}$ мкОм·м. Относительное сопротивление R_T составляет 2400 для проволоки из алюминия особой чистоты при 20,4 К и 1500 для отожженной фольги толщиной 0,1 мм. Предел прочности при растяжении отожженного алюминия А999 при 293 К (20 °С) лишь 40 МПа при относительном удлинении порядка 20 %, однако при температуре жидкого азота (77,4 К) предел прочности возрастает до 120 МПа при относительном удлинении 46 %.

Алюминий марки А995, содержащий 0,005 % примесей, позволяет получать токоведущие жилы с относительным сопротивлением R_T в пределах 1000—1500 при криогенных температурах. У алюминия заметно проявляется магниторезистивный эффект: в магнитном поле с ростом индукции до 2 Тл удельное сопротивление резко возрастает, а в более сильных полях наступает насыщение. С увеличением температуры магниторезистивный эффект усиливается, так что при 20 К удельное сопротивление алюминия марки А999 возрастает до $(5—6)\cdot10^{-5}$ мкОм·м от значения порядка 10^{-6} мкОм·м при увеличении магнитной индукции от 0 до 2 Тл.

У отожженной проводниковой меди с содержанием примесей около 0,03 % (марки М0б) относительное сопротивление R_T может доходить при температуре жидкого водорода до 190—200, а у особо чистой (99,999 %) меди — до 1430.

Для применения в качестве криопроводника при температуре жидкого азота (намного более дешевого хладагента, чем жидкий водород, неон и тем более гелий) значительный интерес представляет бериллий. Бериллий промышленной чистоты с содержанием примесей 0,05 % и более при 70—80 К обладает примерно в 10 раз более низким удельным электрическим сопротивлением по сравнению со сверхчистыми алюминием и медью. Кроме того, приведенные потери для бериллия проходят через заметный минимум при 60—80 К. При 77,4 К удельное сопротивление бериллия чистотой 99,94 % составляет $2\cdot10^{-4}$ мкОм·м (при 293 К около $3\cdot10^{-2}$ мкОм·м). Бериллий примерно на 30 % легче алюминия, но прочнее его. Проволока диаметром 0,5 мм имеет предел прочности при растяжении 700—1000 МПа при относительном удлинении 1—3 %. Однако бериллий в изделиях хрупок, отличается плохой технологичностью, дорог, резко увеличивает свое удельное электрическое сопротивление в магнитном поле, причем возрастание продолжается даже в полях с индукцией выше 4 Тл. Кроме того, бериллий токсичен, особенно в пылевидном состоянии. В результате этих недостатков пока ограничивается применение бериллия в качестве криопроводникового материала.

15.10. КОНТАКТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕКТРОЩЕТКИ

Электрическим контактом называют поверхность соприкосновения токоведущих элементов электротехнических устройств, обладающую высокой проводимостью, а также конструктивное приспособление, обеспечивающее такое соприкосновение. По условиям работы контакты разделяются на неподвижные, разрывные и скользящие.

Неподвижные контакты могут быть зажимными (болтовые, винтовые соединения, зажимы) и цельнометаллическими (сварные или паяные соединения). Цельнометаллические соединения не только механически прочны, но и обеспечивают стабильный электрический контакт с малым переходным сопротивлением. В зажимных контактах поверхность соприкосновения определяется контактным давлением и способностью материала к пластической деформации. Чем меньше удельное электрическое сопротивление материала, чем он мягче и чем выше его коррозионная стойкость, тем меньше переходное сопротивление контакта. Поэтому весьма целесообразно покрытие контактных поверхностей мягкими коррозионностойкими металлами (оловом, серебром, кадмием и др.), а также зачистка их шлифовальной шкуркой. Контакты из меди и ее сплавов чаще всего покрываются оловом. Контакты для высокочастотной техники целесообразно серебрить. Удовлетворительных способов покрытия алюминия защитным металлом пока не разработано. Так как алюминий быстро покрывается на воздухе пленкой окиси с высоким сопротивлением, контактную поверхность рекомендуется зачищать под слоем вазелина. Сталь весьма склонна к коррозии, и поэтому контактные соединения защищаются кадмием, цинком или никелем.

Разрывные контакты служат для периодического замыкания и размыкания электрической цепи. К скользящим относятся подвижные контакты, в которых контактирующие части скользят друг по другу без отрыва. Эти виды контактов являются весьма ответственными и интенсивно нагруженными элементами электрических цепей. К материалам для таких контактов предъявляется комплекс строгих требований: устойчивость против коррозии, могущей вызвать образование на контактной поверхности непроводящей пленки и частичное или полное нарушение проводимости; стойкость против электрической эрозии — износа контактов вследствие плавления, испарения, распыления и переноса металла с одного контакта на другой, обусловленного электрическими разрядами и перегревом контактных точек; стойкость к свариванию; механическая прочность — стойкость к действию сжимающих и ударных нагрузок, а также износостойкость при трении; высокие проводимость и теплофизические свойства; технологичность и способность прирабатываться друг к другу.

Маломощные (слаботочные) разрывные контакты изготовляются из благородных и тугоплавких металлов (платиноидов, золота,

серебра, вольфрама и молибдена) и сплавов на их основе типа твердых растворов. Свойства некоторых материалов для слаботочных контактов приведены в табл. 15.35. Металлы платиновой группы (платина палладий, родий, иридий, рутений, осмий) и сплавы на их основе — лучшие материалы. Платиновые контакты не окисляются и не образуют сернистых пленок, что обеспечивает стабильность переходного сопротивления. У платины минимальный ток дугообразования наибольший (0,9 А) по сравнению с другими благородными металлами (0,35—0,45 А). Напряжение загорания дуги у платины также выше, чем у других металлов. Из-за малой твердости платина в чистом виде редко применяется для контактов. Распространены сплавы платины с иридием, у которых минимальный ток дугообразования и стойкость к электрической эрозии выше, чем у платины. Платино-рутениевые сплавы более прочны и тверды, чем платино-иридиевые, и менее склонны к свариванию контактов по сравнению с платиной. Стойкостью к иглообразованию и к свариванию контактов обладают сплавы платины с никелем. Твердостью и прочностью по сравнению с платиной, а также малой летучестью при высоких температурах характеризуются сплавы платины с родием. Легирование платины вольфрамом и молибденом повышает температуру плавления и твердость материала.

По совокупности свойств палладий как контактный материал уступает платине, но вследствие меньшей стоимости палладий и его сплавы нашли широкое применение. Хорошими свойствами обладают контакты из сплавов палладия с иридием. Хотя они и менее тугоплавки, но значительно дешевле платино-иридиевых сплавов. Сплавы палладия с серебром не образуют сернистых пленок при содержании более 50 % палладия.

Золото, серебро и их сплавы более склонны к дугообразованию, чем платина. Золото — это самый мягкий благородный металл. В чистом виде применяется для прецизионных контактов, работающих при малом нажатии и низком напряжении, так как вследствие неокисляемости поверхности золотые контакты подвержены электрической эрозии. Легирование повышает твердость и стойкость золота к эрозии. Распространены контактные сплавы золота с серебром, содержащие более 50 % золота и не образующие сернистых пленок. Применяются также сплавы золото — платина и золото — никель. Из тройных сплавов золота наиболее известен его твердый нетускнеющий контактный сплав с серебром и платиной. Нашли также применение сплавы золото — серебро — медь и золото — серебро — никель с повышенной твердостью за счет присадки меди и никеля, а также твердый тугоплавкий сплав золото — палладий — никель.

Экономически выгодна замена слаботочных контактов из благородных драгоценных металлов на более дешевые. Согласно ТУ 48-01-760-83 выпускаются контакты из сплава серебро — окись циркония (95/5) с удельным сопротивлением 0,019 мкОм·м и числом Бринелля 66. Заслуживают внимания контакты системы серебро — окись магния (97,5/2,5 и 95/5) с удельным сопротивлением соответственно 0,019 и 0,023 мкОм·м и числом Бринелля 74 и 88, а также из сплава палладий — серебро — никель (25/70/5) с удельным сопротивлением 0,105 мкОм·м и числом Бринелля 35 (ТУ 48-07-132-71).

Достоинствами серебра как контактного материала являются высокие значения удельной электрической проводимости и теплопроводности, что обеспечивает наименьший нагрев контактов. Серебро — практически благородный металл. Его окислы электропроводны, а при нагревании они разлагаются, и поэтому контактное сопротивление остается малым. Недостатками серебра являются его невысокая прочность и твердость в отожженном состоянии, а также склонность к образованию непроводящей пленки сульфида серебра в результате взаимодействия с атмосферным сероводородом в присутствии влаги. Кроме того, сравнительно низкая температура плавления серебра способствует свариванию контактов. Присадка к серебру меди повышает твердость и стойкость к электрической эрозии при малом снижении проводимости. Для работы контактов в условиях образования дуги, а также при малых нажатиях богатые медью сплавы непригодны из-за неустойчивости переходного сопротивления вследствие окисления. Нашли применение сплавы систем серебро — платина, серебро — кадмий и серебро — палладий. Некоторые из них для повышения износостойкости легированы никелем и железом.

Серебро — один из наиболее дефицитных химических элементов, его содержание в земной коре составляет всего лишь $7 \cdot 10^{-6}$ % по массе. Для серебра характерно в последние годы систематическое превышение его потребления над производством первичного металла с восполнением дефицита за счет вторичного. В связи с этим очень остро стоит вопрос экономии серебра в электротехнике и электронике, в том числе при изготовлении и применении контактов и других серебросодержащих материалов и изделий.

Драгоценные металлы (кроме серебра) применяются обычно для контактов в виде тонких гальванических покрытий, нанесенных на детали из меди, латуни, бронзы и других сплавов. Осажденные слои металлов более стойки к электрической эрозии и намного тверже соответствующих массивных материалов. Особо велики твердость у электроосажденных родия (число Бринелля до 700) и платины (до 500), но и у палладия она доходит до 250, у серебра — до 100 и у золота — до 70. Осажденные слои применяются в режиме работы без дуги.

Достоинствами вольфрамовых контактов являются стойкость к появлению дуговых разрядов (минимальный ток дугообразования у вольфрама наибольший), стойкость вследствие тугоплавкости против электрической эрозии и сваривания, малый механический износ из-за высокой твердости материала. Это позволяет эксплуатировать контакты при больших нажатиях, необходимых ввиду окисляемости вольфрама для обеспечения малого переходного сопротивления. Молибден уступает вольфраму в твердости и тугоплавкости и тоже подвержен атмосферной коррозии. Но молибден образует рыхлые окислы, способные нарушить электропроводность контакта, поэтому

при работе на воздухе молибденовые контакты менее надежны. Для работы в вакууме и инертных газах применяются контакты из сплава вольфрам — молибден повышенной твердости.

Сильноточные (мощные) разрывные контакты изготовляются главным образом из металлокерамических композиций (псевдосплавов), получаемых методами порошковой металлургии. Композиции изготовляют на основе серебра и меди: серебро — окись кадмия, серебро — окись меди, серебро — никель, серебро — графит, серебро — никель — графит, серебро — вольфрам — никель, медь — графит, медь — вольфрам — никель. Серебряная или медная фаза обусловливает высокую электрическую проводимость и теплопроводность контакта, а включения или скелет тугоплавкой фазы повышают стойкость к механическому износу, электрической эрозии, свариванию. Композиции получаются либо способом твердофазного спекания спрессованных из порошков заготовок, либо путем пропитки серебром или медью предварительно отпрессованных пористых каркасов из вольфрама или вольфрамоникелевого сплава.

Марки некоторых металлокерамических контактов, их состав и свойства приведены в табл. 15.36. Ряд композиций, изготовленных из особо тонко измельченных порошков, имеют мелкодисперсную структуру. Контакты этого типа, имеющие в конце характеризующей их марки букву «м», более тверды и служат в 1,5—3 раза дольше. Буква «д» в конце марки обозначает двойное спекание и допрессовывание. Контакты для пайки или приварки к контактодержателям со стороны крепежной поверхности обычно имеют подслой. Если в марке контакта присутствует буква «н», то подслой — никелевый. В качестве подслоя применяют также медь, железо, серебро и сплав серебро-никель.

Композиция серебро — окись кадмия широко применяется для контактов в низковольтном аппаратостроении. Рецептура контактов соответствует максимальной электрической износостойкости. Композиция отличается высокой электрической проводимостью и теплопроводностью и низким устойчивым контактным сопротивлением. Контакты из серебра и окиси кадмия надежны в работе при повышенных токовых нагрузках и небольших контактных нажатиях (1,5—10 Н), так как на их поверхности не образуются непроводящие окисные пленки, требующие для их разрушения высоких контактных давлений. Они стойки к привариванию и обладают повышенной дугостойкостью, хотя и уступают композициям, содержащим вольфрам.

Контакты из композиции серебро — окись меди характеризуются высокой стойкостью к электрическому износу и привариванию, обладают низким и устойчивым переходным сопротивлением, при высоких токовых нагрузках не уступают контактам из композиции серебро — окись кадмия.

Контакты из композиции серебро — никель широко используются в аппаратах постоянного и переменного тока низкого напряжения с умеренными нагрузками. Эти контакты обладают низким стабильным переходным сопротивлением, по сопротивлению привариванию и дугостойкости превосходят серебряные, но уступают в этом контактам из композиций серебро — окись кадмия и серебро — окись меди. Однако контакты двух последних типов для облегчения пайки и сварки выпускаются с серебряным подслоем, а композиция серебро — никель легко паяется и сваривается без такого подслоя. В отечественной практике применяются контакты с повышенным содержанием никеля (30 и 40 %), отличающиеся более благоприятными механическими свойствами.

Контакты из композиции серебро — графит весьма стойки к свариванию и к механическому износу, обладают низким контактным сопротивлением, но отличаются повышенным износом при действии дуги и ограниченной механической прочностью и твердостью. Введение графита затрудняет образование электрической дуги (графит отличается высоким напряжением зажигания дуги, составляющим 20 В). Контакты из композиции серебро-никель — графит по сравнению с изготовленными из композиции серебро — никель отличаются повышенной стойкостью к свариванию и затрудненным дугообразованием, но электрическая износостойкость их ниже. Эти контакты применяют в низковольтных аппаратах со значительными токовыми нагрузками и перегрузками (автоматические выключатели). Износостойкость контакта повышается, если серебро-никелевую матрицу выполнять с мелкодисперсной структурой (марка КМК-А33мд). Контакт серебро — никель — графит, как и контакт серебро — графит, применяется в паре с контактом серебро — никель, так как такие комбинированные контактные пары обнаруживают повышенную износостойкость.

Контакты из композиции серебро — вольфрам — никель отличаются высокой стойкостью к оплавлению, свариванию и износу при больших токовых нагрузках, эффективно работают как дуговые контакты в воздушных высоко- и низковольтных выключающих устройствах. Окисление вольфрама способствует повышению переходного сопротивления и не обеспечивает стабильной работы при малых контактных нажатиях. Присадка 2—3 % растворяющегося в вольфраме никеля повышает прочность композиции. Контакты имеют подслой из серебра.

Композиция медь — графит применяется для стойких к свариванию контактов, способных отключать токи 30—100 кА. Для этого контакты изготовляют с 10—15 % пор, с относительно невысокими твердостью и прочностью на разрыв, что гарантирует их размыкание при сваривании. Контакты рассчитаны на небольшое число срабатываний. Контакты марки КМК-Б10, содержащие 3 % графита, выпускаются с медным подслоем без промежуточного слоя. Контакты марки КМК-Б11 трехслойные: между верхним, рабочим слоем с 5 % графита и медным подслоем находится промежуточный слой с 3 % графита. Промежуточный слой уменьшает коробление контакта, возникающее при спекании верхнего слоя и медного подслоя вследствие большой разницы в усадке.

Контакты из композиции медь — вольфрам отличаются от серебряно-вольфрамовых более высокой износостойкостью, сопротивлени-

ем свариванию и оплавлению при больших токах и напряжениях, а также повышенными механическими характеристиками. Вследствие окисления композиция медь — вольфрам применяется для контактов, работающих в масле при высоких контактных нажатиях (дуговые контакты высоковольтных масляных выключателей). Для повышения прочности в композицию вводится 2—3 % никеля. Контакты выпускаются с медным подслоем. Для особо мощных выключателей изготовляются контакты с повышенными дугостойкостью, проводимостью и теплопроводностью, состоящие из трех и более слоев с изменяющимся содержанием вольфрама от максимального в верхнем (рабочем) слое до нулевого в крепежной части.

Медь как контактный материал обладает многими достоинствами: дешев, высокие электрическая проводимость и теплопроводность, достаточно высокая механическая прочность. Основной недостаток — склонность к атмосферной коррозии с образованием оксидных и сульфидных пленок с высоким сопротивлением, способных вывести контакт из строя. По этой причине медь непригодна для слаботочных контактов, однако с успехом применяется в сильноточных аппаратах (контакторах, контроллерах), работающих при напряжениях, способных пробить окисную пленку (выше 100 В), и там, где контакты действуют при заметных контактных нажатиях (не менее 3 Н) и с проскальзыванием, способным разрушить эту пленку. Медь может применяться и для дугогасительных контактов. Под действием дуги оксидная пленка разлагается. Однако механическое отслаивание и термическое разложение окисной пленки вызывают значительный износ сильноточных медных контактов. Сплав меди с 1 % кадмия в 3 раза устойчивее меди к истиранию и в 2 раза более износостоек как контактный материал в тяжело нагруженных контакторах и контроллерах тягового и кранового электрооборудования. Профили для контактов из меди марки М1 (ГОСТ 859-78) поставляются промышленностью в соответствии с ТУ 48-08-314-70 и ТУ 48-08-320-70. Прутки профильные из сплава меди с кадмием (0,9—1,2 % кадмия) для изготовления контактов силовых электрических аппаратов изготовляются в соответствии с ТУ 48-08-500-71. В соответствии с ТУ 48-08-395-71 поставляются профили из хромовой бронзы марки БрХ (0,4—0,7 % хрома) для контактов аппаратостроения.

Металлокерамические контакты изготовляются круглой, прямоугольной (с плоской и сферической поверхностью) и сложной формы. Форма и размеры металлокерамических контактов на основе вольфрама (получаются методом жидкофазного спекания) определяются ГОСТ 13333-75, а контактов, полученных методом твердофазного спекания, — ГОСТ 3884-77.

В качестве припоев при пайке контактов обычно применяются серебряно-медные или серебряно-медно-цинковые припои (ГОСТ 19738-74), а также медно-фосфористые (ГОСТ 4515-81) и др. [15.2, 15.3]. Недостатком фосфористых припоев является хрупкость шва, для пайки к черным металлам медно-фосфористые припои непригодны. Нагрев контактов с контактодержателями под пайку обычно производят в электродах с графитовыми наконечниками, в индукторах или в электропечах с защитной атмосферой.

Таблица 15.35. Свойства металлов и сплавов для слаботочных контактов

Марка	Химический состав, %	Плотность, кг·м$^{-3}$	Температура плавления, °С	Число Бринелля	Удельное сопротивление мкОм·м	Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	ГОСТ или ТУ
Пл99,9—99,7	Платина 99,7—99,9	21 450	1773	40	0,105	71	ГОСТ 13198-77
Пд99,9—99,8	Палладий 99,8—99,9	12 160	1554	32	0,108	71	ГОСТ 13462-79
Рд99,9—99,8	Родий 99,8—99,9	12 400	1966	55	0,045	88	ГОСТ 13098-67
Зл999—999,9	Золото 99,9—99,99	19 300	1063	20	0,022	311	ГОСТ 6835-80
Ср999—999,9	Серебро 99,9—99,99	10 500	961	25	0,016	408	ГОСТ 6836-80
ПлИ-10	Платина — иридий 90/10	21 540	1795	126	0,250	31	ГОСТ 13198-77
ПлИ-25	Платина — иридий 75/25	21 680	1875	246	0,330	16	То же
ПлРу-10	Платина — рутений 90/10	19 950	1780	190	0,430	—	» »
ПлН-4,5	Платина — никель 95,5/4,5	20 170	1700	135	0,230	—	» »
ПлРд-10	Платина — родий 90/10	20 000	1840	90	0,192	—	» »
—	Платина — вольфрам 95/5	21 280	1850	103	0,402	—	—
—	Платина — молибден 90/10	20 500	1800	195	0,585	—	—
ПдИ-10	Палладий — иридий 90/10	12 740	1565	125	0,260	—	ГОСТ 13462-79
ПдИ-18	Палладий — иридий 82/18	13 250	1580	195	0,360	—	То же
ПдСр-20	Палладий — серебро 80/20	11 790	1425	56	0,300	—	» »
ПдСр-40	Палладий — серебро 60/40	11 440	1330	52	0,420	31	» »
ЗлСр750-250	Золото — серебро 75/25	19 960	1044	26	0,099	—	ГОСТ 6835-80
ЗлПл-7	Золото — платина 93/7	19 440	1160	40	0,102	70	То же
ЗлН5	Золото — никель 95/5	18 240	990	100	0,123	—	ЦМТУ 07-220-69
—	Золото — серебро — платина 69/25/6	16 100	1030	112	0,149	55	—
ЗлСрМ583-300	Золото — серебро — медь 58/30/12	13 920	835	125	0,108	—	ГОСТ 6835-80
—	Золото — серебро — никель 70/25/5	15 400	1050	80	0,118	—	—
—	Золото — палладий — никель 65/30/5	16 500	1410	120	0,230	—	—
СрМ960	Серебро — медь 96/4	10 430	880	43	0,018	380	ГОСТ 6836-80
СрМ925	Серебро — медь 92,5/7,5	10 360	779	57	0,019	350	То же
СрМ900	Серебро — медь 90/10	10 320	779	64	0,019	345	» »
СрМ750	Серебро — медь 75/25	10 060	779	82	0,020	325	» »
СрПл-12	Серебро — платина 88/12	11 190	970	115	0,120	—	» »
СрПд-20	Серебро — палладий 80/20	10 790	1070	35	0,102	92	» »

Продолжение табл. 15.35

Марка	Химический состав, %	Плотность, кг·м$^{-3}$	Температура плавления, °С	Число Бринелля	Удельное сопротивление мкОм·м	Удельная теплопроводность Вт/(м·°С)	ГОСТ или ТУ
СрКд86-14	Серебро — кадмий 86/14	10 200	895	52	0,029	—	ЦМТУ 07-211-69
ВРН	Вольфрам 99, 85	19 300	3410	250	0,055	168	ЦМТУ 08Т-26-68
МЧ	Молибден 99, 958	10 200	2620	150	0,052	146	ТУ 48-42-66-71
—	Вольфрам — молибден 95/5	—	3180	280	0,065	—	—

Таблица 15.36. Состав и свойства металлокерамических контактов

Марка контакта	Компоненты и их содержание, %	Плотность, кг·м$^{-3}$	Число Бринелля	Удельное сопротивление, мкОм·м, не более	Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	ГОСТ или ТУ
КМК-А10мн	Серебро — окись кадмия 85/15	9700	100	0,028	325	ТУ 16-538.339-79
КМК-А30	Серебро — никель 70/30	9600	75	0,030	355	ГОСТ 19725-74
КМК-А30м	То же с мелкодисперсной структурой	9700	105	0,029	360	То же
КМК-А31	Серебро — никель 60/40	9500	80	0,035	310	» »
КМК-А31м	То же с мелкодисперсной структурой	9600	115	0,035	310	» »
КМК-А41	Серебро — графит 97/3	9300	50	0,026	—	ТУ 16-538.183-73
КМК-А40	Серебро — графит 95/5	8700	40	0,030	420	ГОСТ 19725-74
КМК-А32	Серебро — никель — графит 68/29/3	8900	65	0,035	355	То же
КМК-А33мд	Серебро — никель — графит 69/29/2	9500	95	0,035	—	ТУ 16.538.183-73
КМК-А60	Серебро — вольфрам — никель 48/50/2	13 500	160	0,041	275	ГОСТ 13333-75
КМК-А61	Серебро — вольфрам — никель 27/70/3	15 000	210	0,045	230	То же
КМК-Б10	Медь — графит 97/3	7300	35	0,040	380	ТУ 16-538.272-75
КМК-Б20	Медь — вольфрам — никель 48/50/2	12 100	150	0,060	190	ГОСТ 13333-75
КМК-Б21	Медь — вольфрам — никель 27/70/3	13 800	200	0,070	135	То же
КМК-Б00	Медь	8600	65	0,021	—	ТУ 16-538.083-78

Таблица 15.37. Марки щеток для электрических машин и области их применения (ГОСТ 2332-75)

Марка	Наименование групп марок	Преимущественная область применения
Г20, Г21, Г22	Угольно-графитные	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г3, 611М, 6110М	Графитные	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2А, ЭГ2АФ, ЭГ4, ЭГ8, ЭГ14, ЭГ51, ЭГ61, ЭГ71, ЭГ74, ЭГ74АФ, ЭГ85	Электрографитированные	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактные кольца
М1, М3, М6, М20, МГ, МГ2, МГ4, МГС5, МГСО	Металлографитные	Низковольтные генераторы и контактные кольца

Продолжение табл. 15.37

Таблица 15.38. Физико-механические и коллекторные характеристики электрощеток (ГОСТ 2332-75)

Марка	Твердость, 10^4 кПа	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	Переходное падение напряжения на пару щеток, В	Износ на коротк козамкнутом коллекторе, мм, не более	Коэффициент трения не более
Г20	—	35—100	2,0—4,3	0,15	0,22
Г21	19,6—59,0	150—420	3,2—5,5	—	0,22
Г22	16,7—53,9	100—230	⩾2,2	0,30	0,25
Г3	6,9—18,6	8—20	0,6—1,4	0,50	0,30
611М	4,9—11,7	8—22	0,6—1,6	0,40	0,30
6110М	4,9—11,7	8—28	0,7—1,7	0,40	0,30
ЭГ2А	6,9—21,6	11—28	0,9—1,9	0,40	0,23

Продолжение табл. 15.38

Марка	Твердость, 10^4 кПа	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	Переходное падение напряжения на пару щеток, В	Износ на коротказамкнутом коллекторе, мм, не более	Коэффициент трения не более
ЭГ2АФ	4,9—21,6	12—35	1,1—2,1	0,40	0,23
ЭГ4	1,9—6,9	6—16	0,8—2,0	0,60	0,25
ЭГ8	7,8—34,3	30—45	1,0—1,8	0,40	0,25
ЭГ14	7,8—29,4	20—38	1,1—2,1	0,40	0,25
ЭГ51	16,6—53,9	20—40	1,0—2,1	0,40	0,22
ЭГ61	—	24—46	1,2—3,0	0,40	0,17
ЭГ71	5,9—13,7	20—35	1,1—2,1	0,40	0,30
ЭГ74	14,7—49,0	35—75	1,2—2,4	0,40	0,22
ЭГ74АФ	19,6—49,0	19—38	1,0—2,0	0,40	0,22
ЭГ85	16,7—49,0	35—75	1,4—2,8	0,40	0,20
М1	7,8—24,6	2—5	1,0—1,9	0,18	0,25
М3	6,9—17,6	6—12	1,4—2,2	0,15	0,25
М6	9,8—24,6	1—6	1,0—2,0	0,35	0,20
М20	7,8—24,6	3—13	1,0—1,8	0,20	0,26
МГ	3,9—13,7	0,04—0,12	≤0,3	0,80	0,20
МГ2	3,9—17,6	0,10—0,25	≤0,6	0,40	0,20
МГ4	9,8—21,6	0,30—1,30	0,6—1,6	0,30	0,20
МГС5	5,9—14,7	2—15	0,7—1,9	0,40	0,22
МГСО	5,9—19,6	Не более 0,30	0,08—0,35	0,60	0,25

Примечание. Предел прочности при сжатии щеток марки Г20 не менее 9,8 МПа.

Таблица 15.39. **Предпочтительные номинальные размеры щеток (ГОСТ 12232.1-77), мм**

Толщина t	Длина a	Высота r	Толщина t	Длина a	Высота r	Толщина t	Длина a	Высота r	Толщина t	Длина a	Высота r
1,6	2	5	5	32	40	12,5	8; 10	25	20	50	64
1,6	2; 2,5	8	6,3	3,2	12,5	12,5	16; 20	32	25	8; 10; 12,5	32
2	2,5; 3,2	8	6,3	4	16	12,5	25; 32	40	25	16; 20; 32	40
2,5	3,2	8	6,3	8; 10	20	12,5	40	50	25	40	50
2,5	4	10	6,3	12,5; 16	25	12,5	50	64	25	50	64
2,5	5	12,5	6,3	20; 25	32	16	6,3	20	32	10; 12,5	32
3,2	4	10	6,3	32	40	16	8	25	32	16; 20; 25	40
3,2	5	12,5	8	4; 5	20	16	10; 12,5;	32	32	40	50
3,2	6,3	16	8	10; 12,5	25		20		32	50	64
4	5	12,5	8	16; 20; 25	32	16	25; 32	40	40	12,5	40
4	6,3	16	8	32	40	16	40	50	40	16; 20; 25;	50
4	8; 10	20	10	5; 6,3	20	16	50	64		32	
5	3,2	12,5	10	8; 12,5	25	20	8	25	40	50	80
5	6,3	16	10	16; 20	32	20	10; 12,5;	32	50	20; 25	50
5	8; 10	20	10	25; 32	40		16		50	32	64
5	12,5; 16	25	10	40	50	20	25; 32	40	50	40	80
5	20; 25	32	12,5	6,3	20	20	40	50			

Примечание. Остальные размеры щеток приведены в ГОСТ 12232.1-77 (t от 0,4 мм, a от 0,8 мм, r от 1,2 до 120 мм).

Диффузионная и контактная точечная сварки являются производительными способами прочного крепления контактов. Для крепления небольших контактов эффективна ультразвуковая и конденсаторная сварка.

Скользящие контакты работают примерно в таких же условиях, что и разрывные, однако специфическим требованием к материалам для них является повышенная стойкость к механическому износу при трении. Скользящие контакты применяются в устройствах токосъема электротранспорта, электрических машинах (между щетками и коллектором или контактными кольцами), в реостатах, ползунковых переключателях и других конструкциях. Значительный износ возникает при сухом трении, если оба контакта изготовлены из одного материала, а также при неудачном выборе пар (например, трение латуни по стали). Высокими качествами обладают контактные пары, составленные из металлического и графитосодержащего материалов. Такой скользящий контакт отличается малым износом от трения. Графит имеет наибольшее напряжение дугообразования по сравнению с металлами и сплавами, и износ контакта от искрения поэтому невелик. На поверхности графита отсутствуют окисные пленки, и контакт имеет прямолинейную вольт-амперную характеристику.

Сортамент и свойства медных и бронзовых контактных проводов, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в § 18.6.

Для изготовления скользящих контактов широкое применение нашли бронзы и латуни, отличающиеся высокой механической прочностью, упругостью и износостойкостью, антифрикционными свойствами, стойкостью к атмосферной коррозии: латуни марок Л63, ЛС59-1, ЛМц58-2, МЖМц59-1-1, бронзы марок БрКд1, БрБ2, БрОФ6,5-0,12 и др. Их свойства приведены в § 15.3 и 15.4.

Сортамент и свойства профилей для коллекторов электрических машин, изготовленных из меди и меди, легированной серебром, приведены в § 18.7. Для рабочих температур до 130 °С широко применяются коллекторные

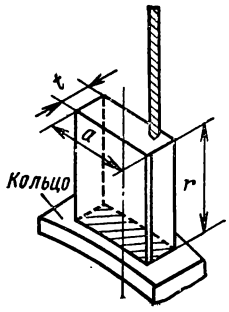
пластины из меди. При нормальной работе на коллекторе образуется блестящая пленка, состоящая главным образом из окиси и гидроокиси меди и называемая политурой. Политура увеличивает переходное сопротивление щеточного контакта и тем самым улучшает коммутацию, а также резко снижает механический износ щеток. При разрушении политуры под действием электрических разрядов или в результате уменьшения содержания влаги в верхних слоях атмосферы (на высотных самолетах) условия коммутации ухудшаются, поверхность коллектора становится шероховатой, износ щеток катастрофически растет. Для работы в высотных условиях созданы специальные типы щеток. Для ответственных быстроходных машин с рабочей температурой до 155 °С целесообразно применять коллекторные пластины и контактные кольца из меди, слабо легированной серебром.

Из сплава меди с кадмием (БрКд1, содержание кадмия 0,9—1,2 %) в соответствии с ГОСТ 4134-75 выпускается кадмиевая медь для коллекторных пластин с числом Бринелля не менее 95, а в соответствии с ТУ 48-21-5038-72 — коллекторный профиль (число Бринелля не менее 105). Согласно ЦМТУ 08-38-67 изготовляются коллекторные полосы из магниевой бронзы (БрМг0,2, магния от 0,1 до 0,35 %) с числом Бринелля не менее 90. Эти профили применяются для быстроходных машин с рабочими температурами до 130 и 230 °С соответственно. Для высокотемпературных скоростных машин выпускаются коллекторные полосы из хромовой бронзы (БрХ0,7, содержание хрома 0,4—1 %) с числом Бринелля не менее 100 (ТУ 48-21-154-72) и из циркониевой бронзы (БрЦр0,4, содержание циркония от 0,3 до 0,5 %) с числом Бринелля не менее 115 (ТУ 48-21-222-72).

Для изготовления контактных колец электрических машин с плотностью тока под щетками до 15—20 А/см² целесообразно применять стойкую к коррозии хромоникелевую нержавеющую сталь (Х18Н9Т) и прочный, стойкий к вибрации и обладающий антифрикционными свойствами серый чугун (СЧ18-36). Для контактных колец с плотностью тока под щетками свыше 15 А/см² применяется оловянно-цинковая бронза Бр04Ц4С2,5, обладающая хорошими антифрикционными свойствами благодаря наличию свинца и высокой механической прочностью, обусловленной добавкой цинка (число Бринелля 60). Перспективными с точки зрения технологии являются контактные кольца, прессованные из медного порошка (металлокерамические), могущие работать при температурах до 155 °С.

Щетки для электрических машин (электрощетки) являются неподвижной частью скользящего контакта для подвода и отвода тока на коллекторах и контактных кольцах. Качество щеток оценивается следующими характеристиками: твердостью, удельным электрическим сопротивлением, переходным падением напряжения на пару щеток, износостойкостью, коэффициентом трения, допустимой плотностью тока, допустимой окружной скоростью коллектора или контактного кольца, давлением на щетку при работе. В соответствии с ГОСТ 2332-75 для электрических машин общего применения выпускаются 26 марок щеток, разделяющихся на четыре группы. Эти марки и преимущественные области их применения приведены в табл. 15.37. Физико-механические и коллекторные характеристики щеток всех марок должны соответствовать указанным в табл. 15.38 данным.

Рис. 15.3. Расположение щетки на контактном кольце электрической машины



Сведения о вольт-амперных характеристиках щеточного контакта и о влиянии некоторых параметров электрической цепи на износ электрощеток можно найти в [15.15].

Угольно-графитные щетки изготовляют прессованием из графита с введением других углеродистых материалов (кокса, сажи) и связующих веществ (смолы, пеков) с последующим обжигом при температуре около 1400 °С. Они отличаются высокой твердостью и высоким удельным сопротивлением.

Графитные щетки изготовляют из натурального графита без связующих (мягкие сорта) и с применением связующего (твердые сорта). Мягкие щетки после прессования не спекаются. Эти щетки отличаются мягкостью и при работе создают незначительный шум.

Электрографитированные щетки изготовляют из порошков графита и других углеродистых материалов (кокса, сажи) с введением связующих высокотемпературным обжигом при 2500 °С. При этом удаляются примеси и происходит графитизация — образование электротехнического поликристаллического плотного графита с увеличенным размером кристаллов. Эти щетки обладают высокой механической прочностью и стойкостью к толчкообразному изменению нагрузки (тяговые электродвигатели). В зависимости от рецептуры и режима обработки они могут иметь различную твердость, обеспечивают хорошую коммутацию в быстроходных машинах.

Металлографитные щетки изготовляют из смеси порошков графита и меди с добавлением в необходимых случаях порошков свинца, олова и серебра. Эти щетки отличаются особо низким удельным сопротивлением, малым переходным падением напряжения и допускают повышенную плотность тока. Поэтому их целесообразно применять в электрических машинах низкого напряжения, в том числе и рассчитанных на большие токи.

Типы и размеры изготовляемых электрощеток регламентируются ГОСТ 12232.1-77. Стандартные размеры щеток приведены в табл. 15.39. Обозначение размеров соответствует рис. 15.3, на котором показано расположение щетки на контактном кольце электрической машины. При расположении щетки на

коллекторе размер a будет являться осевым размером щетки (вдоль оси вращения машины), а размер t — тангенциальным.

15.11. ЦЕНЫ

Цены на некоторые проводниковые материалы и изготовленную из них проволоку приведены в табл. 15.40. Интервал цен, указанный в таблице, определяется в основном диапазоне размеров или сечений материалов и полуфабрикатов.

Таблица 15.40. **Цены на некоторые проводникозые материалы и полуфабрикаты из них**

Наименование металла или полуфабриката	Техническая документация	Цена, руб/т
Медь	ГОСТ 193-79	1150—1175
Латуни литейные	ГОСТ 1020-77	825—975
Проволока из бронзы БрБ2	ГОСТ 15834-77	8200—28 550
Алюминий	ТУ 48-5-136-76	905—1375
Проволока нейзильберовая	ГОСТ 5220-78	1930—6850
Проволока манганиновая	ГОСТ 10155-75	1740—130 000
Проволока константановая	ГОСТ 5307-77	2500—142 000
Проволока нихромовая:	ГОСТ 8803-77	
диаметром 0,2—0,4 мм		15 970—19 620
диаметром 0,014 мм		3886*
диаметром 0,009 мм		20 428*

* руб/кг.

Список литературы

15.1. **Фридман Г. Н.** Проводниковые материалы. — В кн.: Электротехнический справочник. 5-е изд./ Под общ. ред. П. Г. Грудинского и др. Т. 1. М.: Энергия, 1975.

15.2. **Справочник** по электротехническим материалам, 2-е изд./ Под ред. Ю. В. Корицкого В. В. Пасынкова. Б. М. Тареева. Т. 3. М.: Энергия, 1976. 896 с.

15.3. **Электротехнические** материалы. Справочник/В. Б. Березин, Н. С. Прохоров, Г. А. Рыков, А. М. Хайкин. 3-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1983. 504 с.

15.4. **Цветные** металлы и сплавы. Справочник/ М. Б. Таубкин, С. А. Цукерман, Д. Г. Карпачев и др. М.: Металлургия, т. I, 1975. 216 с.; т. II, 1975. 207 с.

15.5. **Прецизионные** сплавы. Справочник/Под ред. Б. В. Молотилова. М.: Металлургия, 1974. 448 с.

15.6. **Усов В. В., Займовский А. С.** Проводниковые, реостатные и контактные материалы. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1957. 184 с.

15.7. **Ейльман Л. С.** Проводниковые материалы в электротехнике. М.: Энергия, 1974. 168 с.

15.8. **Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л.** Физические свойства металлов и сплавов/ Под ред. Б. Г. Лившица. М.: Металлургия, 1980. 320 с.

15.9. **Металлы** и сплавы для электровакуумных приборов/А. С. Гладков, В. М. Амосов, Б. В. Копецкий, А. М. Левин. М.: Энергия, 1969. 599 с.

15.10. **Воронцова Л. А., Маслов В. В., Пешков И. Б.** Алюминий и алюминевые сплавы в электротехнических изделиях. М.: Энергия, 1971. 223 с.

15.11. **Малышев В. М., Румянцев Д. В.** Серебро. М.: Металлургия, 1976. 311 с.

15.12. **Сверхпроводящие** материалы/Е. М. Савицкий, Ю. В. Ефимов, Н. Д. Козлова и др. М.: Металлургия, 1976. 296 с.

15.13. **Свалов Г. Г., Белый Д. И.** Сверхпроводящие и криорезистивные обмоточные провода. М.: Энергия, 1976. 168 с.

15.14. **Реут Е. К., Саксонов И. Н.** Электрические контакты. М.: Воениздат, 1971. 160 с.

15.15. **Лившиц П. С.** Скользящий контакт электрических машин. М.: Энергия, 1974. 272 с.

15.16. **Лившиц П. С.** Справочник по щеткам электрических машин. М.: Энергоатомиздат; 1983. 216 с.

Раздел 16

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

16.1. Назначение магнитных материалов. Общие сведения о параметрах и характеристиках 439
16.2. Классификация магнитных материалов 442
16.3. Магнитные материалы для работы в широком диапазоне изменения магнитных индукций на низких и повышенных частотах 446
16.4. Магнитные материалы для работы в слабых магнитных полях 450
16.5. Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса 454
16.6. Магнитно-мягкие материалы специального назначения 457
16.7. Магнитные материалы для постоянных магнитов 459
16.8. Цены 462
Список литературы 463

16.1. НАЗНАЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПАРАМЕТРАХ И ХАРАКТЕРИСТИКАХ

Магнитные материалы имеют в технике широкое применение. В основном они играют роль концентраторов, проводников и источников магнитного потока. Магнитные материалы являются основой современных генераторов и двигателей, трансформаторов, различных типов аппаратов и приборов автоматики, вычислительной и измерительной техники, электромагнитов и дросселей, постоянных магнитов и т. д.

В общем случае все магнитные материалы принято делить на две большие группы: магнитно-мягкие, используемые в основном как проводники магнитного потока; магнитно-твердые, используемые как источники магнитного поля.

Необходимые характеристики магнитных материалов определяются в процессе перемагничивания, описываемого при циклическом изменении магнитного поля в координатах магнитной индукции B (намагниченности M) и напряженности поля H петлей гистерезиса (рис. 16.1). При этом связь магнитной индукции, намагниченности и напряженности поля выражается соотношением

$$B=\mu_0(H+M),$$

где $\mu_0=4\cdot10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

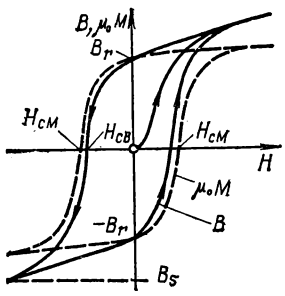


Рис. 16.1. Зависимость магнитной индукции и намагниченности ферромагнитного материала от напряженности поля

По петле магнитного гистерезиса определяются основные параметры магнитных материалов: индукция насыщения B_s, максимальная напряженность поля H_m, остаточная индукция B_r, коэрцитивная сила H_c. Площадь,

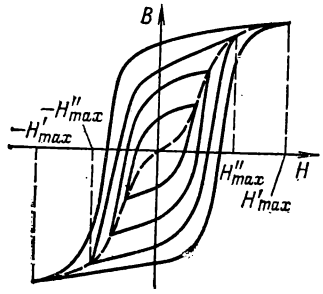


Рис. 16.2. Симметричные петли гистерезиса магнитного материала

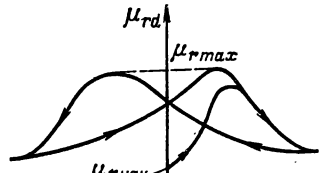


Рис. 16.3. Зависимость дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности поля

заключенная внутри петли магнитного гистерезиса, является мерой энергии, преобразованной в теплоту при перемагничивании. Энергия, затраченная на перемагничивание 1 м³ объема магнитного материала, определяется по формуле

$$w_r = \mu_0 \int H\,dM = \int H\,dB.$$

Кривая $B(H)$ может быть преобразована в кривую $M(H)$. Поэтому, как видно из рис. 16.1, следует различать понятия коэрцитивной силы по индукции H_{cB} и коэрцитивной силы по намагниченности H_{cM}. Зависимость $B(H)$ при монотонном изменении напряженности поля от нуля до максимального значения называется первоначальной кривой намагничивания. Для расчетов пользуются основной кривой

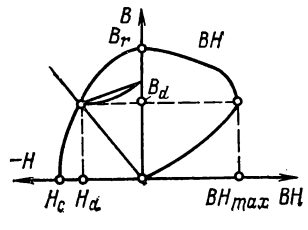


Рис. 16.4. Кривая размагничивания и зависимость энергии магнитного материала от напряженности поля

намагничивания, получаемой соединением вершин симметричных петель гистерезиса, получаемых при различных максимальных значениях напряженности поля (рис. 16.2).

Связь напряженности магнитного поля H и намагниченности магнитного материала M выражается через коэффициент пропорциональности, называемой магнитной восприимчивостью $\varkappa$

$$\varkappa = M/H.$$

Отношение магнитной индукции B к напряженности поля H в материале определяется абсолютной магнитной проницаемостью μ_a:

$$\mu_a = B/H.$$

В общем случае, если магнитная индукция и напряженность поля являются векторами, то проницаемость — тензором. Численно проницаемость характеризуется относительной проницаемостью

$$\mu_r = \mu_a/\mu_0.$$

Отношение изменения ΔB к соответствующему изменению ΔH на кривой намагничивания дает относительную дифференциальную магнитную проницаемость (рис. 16.3)

$$\mu_{rd} = \frac{dB}{\mu_0\,dH}.$$

Полученная таким образом величина в полях с напряженностью, близкой к нулю, носит название относительной начальной проницаемости, а максимальное ее значение на всей кривой намагничивания — относительной максимальной проницаемости.

Для характеристики магнитно-твердых материалов пользуются понятием размагничивающей части петли гистерезиса, находящейся во втором квадранте координатной плоскости $B(H)$. При наличии у постоянного магнита воздушного зазора остаточная индукция его B_d меньше остаточной индукции материала B_r, измеренной в замкнутой магнитной цепи. Поэтому качество постоянных магнитов характеризуется, как правило, максимальным значением произведения $(BH)_{max}$ (рис. 16.4). Наибольшая энергия, отдаваемая магнитом, получается тогда, когда для данной формы магнита подобран материал, имеющий максимальное значение произведения BH. В этом случае остаточная индукция магнита B_d в сильной степени зависит от формы размагничивающей части кривой $B(H)$ и размагничивающего фактора N, определяемого геометрическими соотношениями самого магнита и воздушного зазора. Истинное значение напряженности поля определяется соотношением

$$H_i = H_e - NM,$$

где H_e — внешнее поле; H_i — поле внутри материала, а магнитной индукции — соответственно соотношением

$$B = \mu_0 (H_e + M - NM).$$

Для оценки стабильности постоянных магнитов пользуются понятием относительной проницаемости возврата ($\mu_{rвозв}$), которая является мерой чувствительности магнитно-твердого

материала к воздействию внешних магнитных полей (рис. 16.4)

$$\mu_{r\,возв} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H}.$$

Все перечисленные параметры могут быть определены из статической петли гистерезиса, полученной при относительно медленном изменении внешнего магнитного поля. Если же время установления напряженности поля соизмеримо со временем перемагничивания материала, то магнитные параметры определяются динамическими характеристиками (петлями гистерезиса), на характер которых влияют такие факторы, как вихревые токи, магнитная вязкость. Основными характеристиками являются: динамическая кривая намагничивания — зависимость максимального значения индукции от максимального значения напряженности поля для семейства симметричных динамических петель гистерезиса; динамическая магнитная проницаемость μ_{ra} (часто называемая амплитудной) — отношение индукции к напряженности поля на динамической кривой намагничивания. Чаще всего амплитудная проницаемость μ_{ra} определяется соотношением

$$\mu_{ra} = B_{max}/\mu_0 H_{max},$$

где B_{max}, H_{max} — соответственно максимальные значения магнитной индукции и напряженности поля.

Для многих материалов в качестве справочной характеристики приводятся удельные потери мощности на частотах 50, 400 Гц при различных значениях индукции (например, $p_{1,0/50}$ — потери на частоте 50 Гц при индукции, равной 1 Тл) и значение тангенса угла потерь. При этом обязательным является указание толщины ленты или пластины из данного магнитного материала.

Особого внимания заслуживает чувствительность магнитных материалов к изменению температуры. Здесь следует различать обратимые изменения свойств материалов в диапазоне незначительных изменений температур и необратимые изменения в широком диапазоне температур, называемые старением. Для учета стабильности в первом случае пользуются значениями температурных коэффициентов α_B, приводимых в справочных данных о материале и определяемых согласно выражению

$$\alpha_B = \frac{\Delta B}{B \Delta T},$$

где ΔB — изменение индукции, вызванное изменением температуры на ΔT; B — магнитная индукция при начальной температуре.

Необратимые процессы характеризуются температурой Кюри и заключаются в исчезновении самопроизвольной намагниченности, уменьшении относительной магнитной проницаемости. Поэтому если велики предельные температуры работы магнитного материала, точка Кюри должна быть известна.

Существенное влияние на процесс намагничивания тела оказывают коэффициенты магнитострикции и анизотропии. Эти параметры, не являясь справочными данными на магнитные материалы, в сильной мере влияют на основные нижеперечисленные магнитные характеристики. Так, для получения магнитно-мягких материалов необходимо, чтобы коэффициенты анизотропии и магнитострикции были минимальными. Это возможно лишь в отсутствие посторонних включений и внутренних механических напряжений, т. е. практически при чистом металле. Поэтому кривые намагничивания различных магнитно-мягких материалов (рис. 16.5) существенно различаются. Чистое железо имеет малую коэрцитивную силу и высокую относительную магнитную проницаемость.

Для получения магнитно-твердых материалов с большой коэрцитивной силой (рис. 16.6) обычно используют: многодоменные материалы, у которых затруднено перемещение границы переходного слоя из-за наличия внутренних напряжений или высокой магнитострикции, посторонних включений или большой энергии анизотропии; однодоменные материалы, у которых достаточно велики энергия анизотропии и анизотропия формы. Раньше изготавливали постоянные магниты из материалов, удовлетворяющих первому условию. В настоящее время существует множество магнитно-твердых материалов, удовлетворяющих и второму условию.

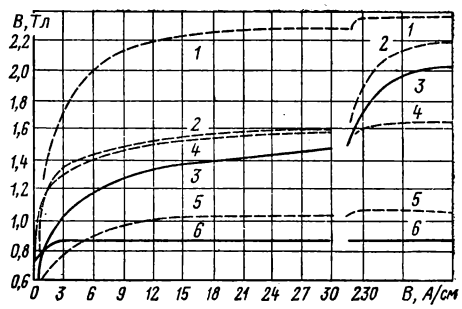


Рис. 16.5. Кривые намагничивания магнитно-мягких материалов:
1 — пермендюр; *2* — низкоуглеродистая сталь; *3* — электротехническая сталь; *4* — пермаллой марки 45Н; *5* — пермаллой марки 79НМ; *6* — пермаллой марки 80НХС

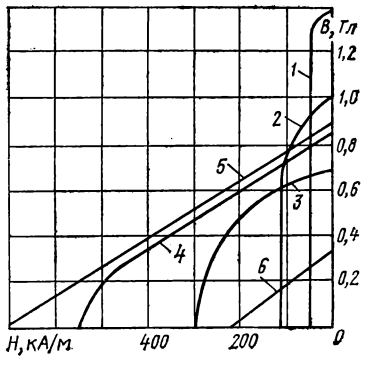


Рис. 16.6. Кривые размагничивания магнитно-твердых материалов:
1 — ЮНДК25БА; *2* — ЮНДК35Т5БА; *3* — ПЛК78; *4* — $PrCo_5$; *5* — $SmCo_5$; *6* — 2БА

16.2. КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Деление магнитных материалов на магнитно-мягкие (МММ) и магнитно-твердые (МТМ) не дает полного представления о магнитных свойствах, их чувствительности к различным воздействиям, возможности использования для конкретных целей. Обычно с понятием чувствительности свойств магнитных материалов к различного рода воздействиям связывают представления о факторах, которые связывают отрицательное влияние. Наиболее существенным в этом плане является химический состав материала (процентное содержание легирующих компонентов или наличие примесей).

Известно, что у ферромагнитных материалов магнитный момент, а значит, и намагниченность насыщения M_s зависят от обменной энергии и кристаллографической структуры. Таким образом, следует ожидать, что у сплавов ферромагнитных материалов друг с другом или с неферромагнитными материалами намагниченность насыщения может изменяться в широких пределах. Например, сплав железа с кобальтом (30—50 %) приводит к повышению M_s приблизительно на 10 % по сравнению с чистым железом. Этот сплав характеризуется наибольшим значением намагниченности насыщения. В железоникелевых сплавах присадка никеля до 10 % не вызывает изменения M_s (рис. 16.7). Увеличение процентного содержания его до 30 % ведет к уменьшению M_s вплоть до нуля. Содержание никеля свыше 30 % ведет к увеличению намагниченности. В сплаве с 50 %-ным содержанием никеля M_s достигает 75 % насыщения чистого железа, а затем монотонно уменьшается до M_s чистого никеля. Здесь следует подчеркнуть, что при незначительных изменениях состава сплавов магнитных материалов намагниченность насыщения, температура Кюри θ, а также коэффициенты магнитострикции и анизотропии слабо изменяются и практически являются нечувствительными к изменению содержания легирующих элементов. Что касается таких характеристик, как относительная магнитная проницаемость, остаточная индукция, коэрцитивная сила, потери на гистерезис, то они чувствительны к воздействию различных факторов. Это открывает большие возможности для получения материалов с требуемыми свойствами. Технологический процесс изготовления их должен быть строго регламентирован, начиная с подбора шихтовых материалов и кончая термической обработкой (рис. 16.8). Предпосылкой улучшения и получения необходимых свойств МММ и МТМ является повышение чистоты исходных компонентов различных сплавов. Так, у чистого железа намагничивание происходит легко, коэрцитивная сила мала. Однако получить свободное от примесей железо практически невозможно. Наиболее часто встречающиеся примеси (углерод, кислород, сера, фосфор и др.) находятся в железе в растворенном состоянии и в виде соединений с ним. Это уменьшает намагниченность, увеличивает коэрцитивную силу, приводит к уменьшению $\mu_{r\,max}$.

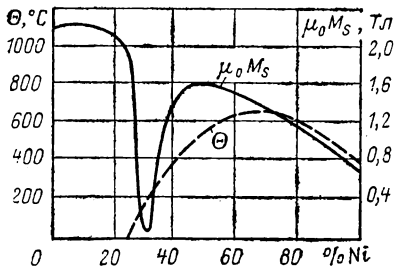


Рис. 16.7. Зависимость намагниченности насыщения и точки Кюри от процентного содержания присадок никеля

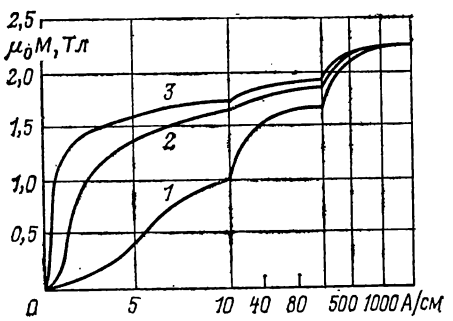


Рис. 16.8. Зависимость кривых намагничивания железа от напряженности поля при различных режимах термообработки:

1 — холодная обработка; *2* — нормальный отжиг; *3* — длительный отжиг

Для получения магнитных материалов с большим удельным сопротивлением и большой проницаемостью при индукции 1,2—1,7 Тл используют добавку кремния от 0,5 до 4 %, обезуглероживающего примеси железа. При этом кремний способствует росту крупных зерен, улучшающих магнитные свойства, увеличивает электрическое сопротивление, что приводит к снижению потерь на вихревые токи при работе материала в переменных полях (рис. 16.9).

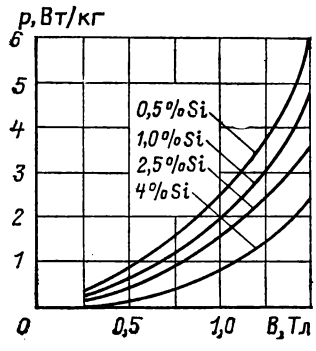


Рис. 16.9. Зависимость удельных потерь от индукции при различном процентном содержании кремния

Наивыгоднейшим сплавом для обеспечения высокого значения магнитной проницаемости является сплав железа с никелем (пермаллой). Высокие магнитные свойства пермаллоев объясняются малыми коэффициентами анизотропии и магнитострикции. При этом коэффициент анизотропии меняет знак, проходя через нуль при 70 %-ном содержании никеля, а при 82 %-ном содержании приближается к нулю коэффициент магнитострикции. Именно поэтому пермаллой с 78 %-ным содержанием нике-

ля обладает очень большой $\mu_{r\,max}$ и малой H_c. Дальнейшее улучшение свойств этих сплавов достигается специальными видами термической обработки (рис. 16.10).

Для получения материалов с большой начальной и максимальной относительной проницаемостью, высокой индукцией насыщения и малой коэрцитивной силой используют сплавы с 45 и 50 %-ным содержанием никеля (45Н и 50Н). Большая прямоугольность гистерезисного цикла достигается использованием сплавов с кристаллографической и магнитной текстурой. Повышение чувствительности к слабым магнитным полям обеспечивают легированием пермаллоевых сплавов молибденом, хромом и кремнием, хромом и медью.

Часто требуются материалы с постоянной μ_r в малых полях. Такие материалы получаются путем сплава железо — никель — кобальт (30 % Fe, 25 % Co, 45 % Ni) и называются перминварами. Они обладают практически безгистерезисной кривой перемагничивания в малых полях. Постоянной μ_r обладают также сплавы никель — железо — медь (45 % Ni, 45 % Fe, 10 % Cu), называемые изопермами.

Для получения больших значений индукции при сравнительно небольших полях, необходимых для построения магнитных систем измерительных приборов, используются материалы на основе сплавов железо — кобальт (50 % Co, 1,7 % V, остальное — железо), называемых пермендюром.

В некоторых областях техники требуются термозависимые и магнитострикционные магнитные материалы. Для получения первых используют сплавы на основе никеля с медью (30—40 % Cu, остальное — никель) — кальмаллои. Для получения магнитострикционных материалов исходными компонентами являются сплав железа с 14 % алюминия, никель и кобальтовый феррит $CoO : Fe_2O_3$.

Материалы, работающие в динамическом режиме, должны обладать большим электрическим сопротивлением для получения минимальных потерь на вихревые токи в широком частотном диапазоне работы. Большое распространение здесь получили неметаллические магнитные материалы — ферримагнетики, к которым относятся ферриты. Электрические и магнитные свойства их в сильной степени зависят от состава и структуры. Для увеличения, например, значений начальной относительной магнитной проницаемости широко используются никель-цинковые и марганцово-цинковые

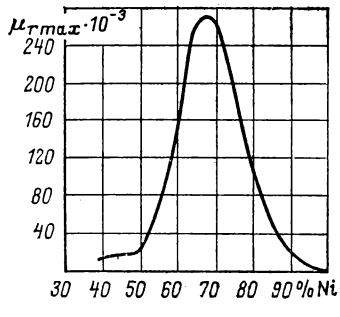


Рис. 16.10. Зависимость максимальной магнитной проницаемости пермаллоя от процентного содержания никеля при термической обработке в магнитном поле

сплавы. Улучшения температурной стабильности добиваются добавлением небольшого количества крупнозернистого феррита с несколько меньшей точкой Кюри. Увеличение относительной проницаемости обеспечивают путем подбора компонентов материала. Например, добавка 0,5 % Fe к никель-цинковому ферриту приводит к увеличению μ_r в 5 раз.

Немного раньше ферритов промышленное внедрение получили магнитодиэлектрики. Исходным материалом для них служило карбонильное железо — порошок. Снижения потерь на гистерезис можно добиться, обрабатывая порошок в среде азота, но при этом уменьшается магнитная проницаемость. Наоборот, для увеличения μ_r порошок отжигают в водородной печи для удаления углерода. Наряду с карбонильным железом после открытия пермаллоев ведутся работы по изготовлению порошков из сплавов с высокой магнитной проницаемостью (молибденовый пермаллой). Большое распространение получили магнитодиэлектрики на основе порошка из сплава альсифер (85 % Fe, 9,5 % Si, 5,5 % Al). Сам сплав хрупкий и имеет высокую магнитную проницаемость.

В последние годы созданы аморфные магнитные материалы, которые по структуре внутреннего строения можно отнести к стеклообразным твердым телам. Аморфное состояние металлических сплавов возникает при высоких скоростях охлаждения расплавов, когда зарождение и рост кристаллической фазы не успевают происходить.

Аморфные материалы обладают повышенной твердостью, прочностью, высокой коррозионной стойкостью. Эти качества обусловлены отсутствием в аморфных сплавах границ зерен. Удельное сопротивление аморфных сплавов в 3—5 раз выше, чем кристаллических. Температурный коэффициент сопротивления примерно в 10 раз ниже, и, что очень важно, в определенном интервале температур может иметь отрицательное значение. Присутствие в ферромагнитных сплавах металлоидных элементов снижает намагниченность насыщения аморфных сплавов. Аморфные сплавы так же, как и кристаллические, имеют доменную структуру. Магнитострикция насыщения у аморфных ферромагнетиков несколько выше, но так же, как и у кристаллических сплавов, имеются составы, для которых магнитострикция равна нулю. Этим составам аморфных сплавов соответствует минимальное значение магнитной проницаемости.

Для получения постоянных магнитных полей большой напряженности используются постоянные магниты, выполненные из магнитотвердых материалов. Впервые для изготовления МТМ использовались углеродистые стали с содержанием углерода до 1 %. Улучшение свойств МТМ достигалось добавлением легирующих элементов (вольфрам, хром, молибден, кобальт). Стремление к удешевлению МТМ привело к созданию сплавов (ЮНД) на основе железа, никеля и алюминия (12 % Al, 25 % Ni). Добавление к этим сплавам кобальта (ЮНДК) еще больше увеличивает H_c, но одновременно уменьшает B_r. Охлаждение сплавов от точки Кюри в магнитном поле делает материал анизотропным (текстурованным). При этом увеличивается B_r, петля гистерезиса

становится прямоугольной, увеличивается магнитная энергия.

Широкое распространение имеют дисперсионно-твердеющие сплавы типа викаллой (железо — никель — медь, железо — кобальт — ванадий), хорошо поддающиеся механической обработке, но уступающие по магнитным свойствам материалам типа ЮНДК.

Гораздо большей коэрцитивной силой обладают сплавы типа ПлК, в которых имеются компоненты из драгоценных металлов, например платина. Эти сплавы (содержание Pt до 78 %) имеют большую коэрцитивную силу, магнитную энергию и используются для миниатюрных магнитов.

В последние годы получены магнитные материалы с очень большими (пока рекордными) значениями коэрцитивной силы и магнитной энергии, выполненные на основе сплава редкоземельных материалов с кобальтом. Они открывают широкие возможности для проектирования микромагнитных систем в различных современных областях техники.

Большие значения констант анизотропии и размеры однодоменных частиц бариевых ферритов явилось причиной широкого использования их для изготовления постоянных магнитов со значительной магнитной энергией. Улучшенные характеристики наблюдаются у магнитотекстурованных образцов (прессование в магнитном поле). Нетекстурованные магниты из бариевых ферритов обозначаются БИ, а текстурованные — БА.

Таким образом, становится очевидной связь магнитных свойств с химическим составом конечного продукта, показывающая на возможность получения магнитных материалов с заданными необходимыми параметрами и использования их в конкретных целях.

Одним из классифицирующих критериев применимости материала для тех или иных цепей является рабочий участок кривой перемагничивания на петле магнитного гистерезиса. На рис. 16.11 представлены области работы основных групп магнитных материалов в зависимости от условий их использования.

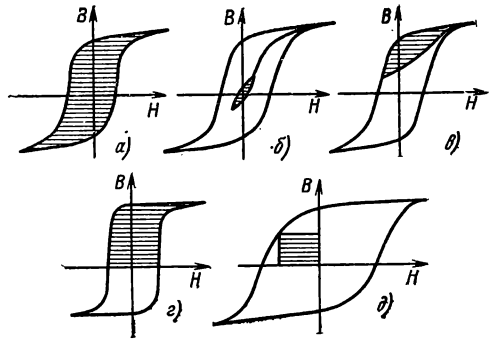


Рис. 16.11. Области работы основных групп магнитных материалов:

а — материалы для работы в широком диапазоне изменения индукции; *б* — материалы для работы в слабых полях; *в* — материалы для магнитопроводов релейных и импульсных устройств; *г* — материалы для запоминающих устройств и магнитных усилителей; *д* — материалы для постоянных магнитов

От материалов, область работы которых характеризуется рис. 16.11, *а*, требуется, как правило, высокое значение индукции насыщения, малые потери на перемагничивание в области низких частот. Используются такие материалы во многих электротехнических устройствах, включая машины постоянного и переменного тока, силовые трансформаторы, силовую коммутирующую аппаратуру. Основными требованиями здесь являются обеспечение хорошей магнитной связи между элементами устройств, обеспечение значительного магнитного потока при минимальном расходе магнитного материала, обеспечение возможно меньших потерь на перемагничивание. Первое требование, как правило, выполняется выбором рабочей точки на кривой намагничивания, соответствующей максимальной относительной магнитной проницаемости; второе удовлетворяется использованием материалов с большой индукцией насыщения, основным компонентом которых является железо. Обеспечение возможно меньших потерь на гистерезис и вихревые токи связано как с магнитными свойствами, зависящими от H_c, так и с электрическими и конструктивными свойствами, зависящими от содержания различных присадок и толщины листов магнитопроводов. Следует отметить, что увеличение удельного сопротивления в применяемых сплавах ограничено, так как проводимость является характерным свойством металла как основного компонента магнитного материала; уменьшение толщины листов магнитопроводов ограничивается экономическими соображениями. Поэтому группа материалов (в основном электротехнические стали), использующая в качестве рабочего участка всю петлю гистерезиса, применяется в устройствах, работающих на низких частотах.

При построении аппаратуры передачи и приема информации, малогабаритных трансформаторов питания, дросселей и т. д. требуются магнитные материалы, обладающие высокой проницаемостью на начальном участке кривой $B(H)$, малыми потерями на гистерезис и вихревые токи (рис. 16.11, *б*). Здесь широкое применение находят металлические листовые, порошкообразные (магнитодиэлектрики) и оксидные (ферриты) материалы. Высокое значение $\mu_{r\,н}$ обеспечивается внутриструктурными напряжениями, минимальными коэффициентами магнитострикции и анизотропии. На рис. 16.12 для сравнения показаны области работы используемых магнитных материалов типа пермаллоев, ферритов и магнитодиэлектриков. Как видно из рисунка, хотя $\mu_{r\,н}$ у магнитодиэлектриков значительно меньше, чем у металлических материалов, они являются так же, как и ферриты практически незаменимыми при

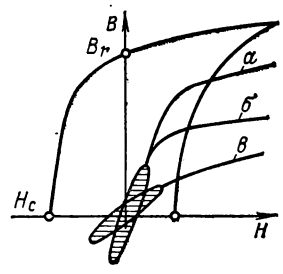


Рис. 16.12. Сравнительные характеристики для материалов, работающих в слабых полях:

а — пермаллой; *б* — феррит; *в* — магнитодиэлектрик

работе в широком частотном диапазоне. Объясняется это теми обстоятельствами, которые характеризуют технологические свойства и стоимость материала. Большое значение имеет факт широкого внедрения ферритов, вытесняющих в последнее время магнитодиэлектрики. Что касается частотных свойств материалов, то их использование в зависимости от типа материала распространяется на области средних (пермаллои), высоких и сверхвысоких (ферриты, магнитодиэлектрики) частот.

В измерительных и регулировочных трансформаторах при широком изменении индукции (порядка 0,1—0,3 Тл) требуется постоянство коэффициента передачи, минимальное значение активных и реактивных потерь. Для выполнения этих требований магнитный материал должен иметь большую и мало изменяющуюся проницаемость в широком диапазоне изменения индукций. Оценочными показателями здесь являются максимальная эффективная относительная проницаемость и диапазон индукции, соответствующий уменьшению ее на определенную конкретную величину. Чем выше этот показатель, тем материал лучше. Удельные потери определяются удельным сопротивлением материала и толщиной его. Большое распространение здесь получили текстурованные кремнистые стали с содержанием кремния до 6 %, имеющие большое удельное сопротивление ρ. Широкий диапазон индукции с постоянной проницаемостью обеспечивается за счет высокой индукции насыщения. Возможно применение и железоникелевых сплавов (содержание никеля 50—75 %) с малой толщиной листов материала, однако это связано с ограничениями экономического характера, приводящими к увеличению стоимости материала.

Особые требования предъявляются к материалам импульсных трансформаторов, работающих с униполярными импульсами. Важным здесь является большая относительная импульсная проницаемость, определяемая как

$$\mu_{r\text{и}} = \frac{B_{max} - B_r}{\mu_0 H_{max}}.$$

Обеспечивается это высокой индукцией насыщения, малым значением остаточной индукции используемого материала (область работы определяется рис. 16.11, *в*). Для выполнения указанных требований часто используют специальные железоникелевые сплавы (содержание никеля 60—65 %) с $B_r/B_{max}=0{,}2$; марганцово-цинковые ферриты, имеющие это отношение на уровне 0,2—0,3 и начальную относительную проницаемость не менее 5000, но отличающиеся дешевизной получения. При использовании материалов с прямоугольной петлей гистерезиса большой эффект дает подмагничивание полем противоположной полярности (рис. 16.13). Так, подмагничивание отрицательным полем H_0 приводит к изменению индукции $\Delta B''$, при воздействии униполярного импульса намного превосходящему изменение $\Delta B'$ в отсутствие подмагничивающего поля. Иногда для получения требуемого значения $\mu_{r\text{и}}$ вводят в устройство воздушный зазор, приводящий к уменьшению эффективного значения остаточной индукции при сохранении на прежнем уровне B_{max}.

Требования к магнитным материалам реле и различной коммутационной аппаратуры (рабочий участок представлен рис. 16.11, *в*) определяются надежностью срабатывания, отпускания и быстродействием. Для обеспечения надежности срабатывания материалы должны иметь высокое значение намагниченности при малых полях. Надежность отпускания определяется H_c материала. Быстродействие зависит от удельного электрического сопротивления материала. Поэтому при проектировании, например, контакторов, в которых силы магнитного поля преодолевают большие противодействующие усилия, на первый план выдвигается критерий надежности срабатывания и надежности отпускания. Постоянная времени здесь в основном определяется механическими параметрами. В этой группе реле используют обычно малоуглеродистую сталь или технически чистое железо. В чувствительных реле высокого быстродействия большего внимания заслуживают надежность отпускания и быстродействие. Надежность срабатывания обеспечивается легкостью якоря и незначительной упругостью контактных пружин. Здесь нашли применение железоникелевые сплавы (шихтованный магнитопровод) и магнитно-мягкие ферриты. В нормальных коммутационных реле переменного тока учитываются все требования — надежность срабатывания, надежность отпускания, быстродействие. С учетом стоимости и срока службы применяется в качестве магнитного материала низколегированная электротехническая сталь.

В последние годы все большее распространение приобретает магнитный способ запоминания информации. Большое применение запоминающие устройства (ЗУ) на магнитных элементах нашли в вычислительной технике. Для обеспечения надежности достоверной записи и воспроизведения информации требуются материалы с высокой намагниченностью. Это позволяет получить большую разность индукций между B_r при одном направлении поля и B_{max} при противоположном. Кривая перехода от $+B_r$ к $-B_{max}$ должна быть крутой для обеспечения значительной скорости изменения индукции dB/dt. С этой же целью проводимость материала по возможности должна быть низкой. Кроме коэффициента прямоугольности $\alpha_п = B_r/B_{max}$ качество магнитного материала (см. рис. 16.11, *г*) оценивается коэффициентом квадратности R_s (рис. 16.14)

$$R_s = \frac{B\,(\text{при} - 0{,}5H_{max})}{B\,(\text{при} + H_{max})}.$$

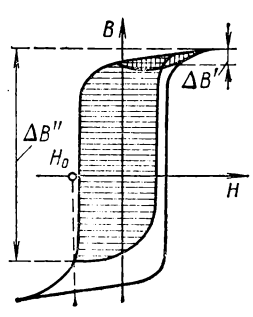


Рис. 16.13. Кривые импульсного намагничивания материалов без подмагничивания и с подмагничиванием постоянным магнитным полем

Высококачественный материал должен иметь большой коэффициент R_s и узкую петлю гистерезиса. Кроме того, используемые в запоминающих устройствах материалы должны иметь минимальное время переключения t_s, с, определяемое как

$$t_s = 10\,\frac{\mu B_{max}\, d^2}{\rho\,(H_{max} - H_c)}\,,$$

где B_{max}, H_{max} — максимальные значения индукции и напряженности поля; Тл, А/м; H_c — коэрцитивная сила, А/м; d — толщина материала, м; ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

Широко используются для элементов ЗУ и магнитных усилителей пермаллой с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), имеющий кубическую текстуру, ферриты с ППГ, объем внедрения которых самый большой из-за дешевизны изготовления и минимального времени переключения. Эти преимущества ферритов компенсируют такие недостатки, как высокий температурный коэффициент и низкие значения индукции.

В табл. 16.1 приведены сравнительные данные о температурных коэффициентах проницаемости α_μ различных групп МММ с разной начальной проницаемостью $\mu_{r\text{н}}$ в интервале температур 20—70 °С

$$\alpha_\mu = \frac{\mu_{r2} - \mu_{r1}}{\mu_{r1}\,(T_2 - T_1)}\,,$$

где T_2 и T_1 — температуры, при которых измерены проницаемости μ_{r2} и μ_{r1}.

Большой объем производства магнитных материалов приходится на магнитно-твердые материалы, служащие первичным сырьем для изготовления постоянных магнитов. Рабочий участок у них находится во втором квадранте петли магнитного гистерезиса (см. рис. 16.11, *д*). Поскольку основное целевое назначение постоянных магнитов заключается в создании постоянных магнитных полей, магнитно-твердые материалы характеризуются магнитной энергией, которую можно развить в заданной магнитной системе. Она определяется в зависимости от условий работы остаточной индукцией, коэрцитивной силой и степенью выпуклости кривой размагничивания (рис. 16.15).

В настоящее время для изготовления постоянных магнитов большое распространение получили: мартенситные стали; дисперсионно-твердеющие сплавы; деформируемые сплавы; сплавы со сверхструктурой; порошковые магнитные материалы; материалы с обменной анизотропией.

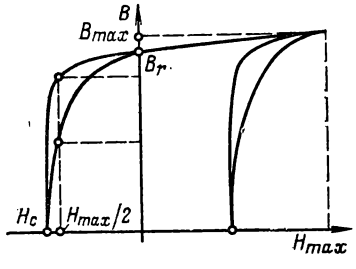


Рис. 16.14. Петли гистерезиса с одинаковым коэффициентом прямоугольности и различным коэффициентом квадратичности

Таблица 16.1. **Температурный коэффициент проницаемости МММ**

$\mu_{r\text{н}}$	α_μ, 10^{-3} °С$^{-1}$		
	Металлические листовые материалы	Ферриты	Магнитодиэлектрики
10	—	—0,8—0,5	—0,1÷+0,1
35	—	0,5	0,2—0,5
180	—	0,2—1,5	0,2
450	1	3,5	—
2000	2	1—3	—
5000	4,5	3—10	—
10 000	1	—	—
50 000	1—2	—	—
100 000	1	—	—

16.3. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАБОТЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ ИНДУКЦИЙ НА НИЗКИХ И ПОВЫШЕННЫХ ЧАСТОТАХ

Самым распространенным ферромагнитным веществом является железо. Получить свободное от примесей железо практически невозможно. Наибольшее распространение получило технически чистое железо (низкоуглеродистая электротехническая сталь). Его как самостоятельный материал используют для изготовления сердечников электромагнитов постоянного тока, полюсных башмаков, реле и ряда других устройств, работающих в постоянных и низкочастотных магнитных полях практически на всех участках петли магнитного гистерезиса. Применение низкоуглеродистой стали для работы в переменных полях ограничено из-за низкого удельного сопротивления.

В СССР тонколистовая низкоуглеродистая сталь выпускается согласно ГОСТ 3836-83 [16.3] горячекатаной и холоднокатаной.

Содержание углерода в них не превышает 0,04 %, а других примесей 0,6 % (табл. 16.2). ГОСТ 11036-75 [16.6] регламентирует магнитные свойства сортовой низкоуглеродистой стали с содержанием углерода до 0,035 % и других примесей до 0,95 % (табл. 16.3).

За рубежом из низкоуглеродистых сталей широко используется железо марок «Гиперм 0», армко-железо, близкое по своим свойствам к отечественным, и железо марок R_3 и S_3, несколько превосходящее их по значениям $\mu_{r\text{нач}}$, $\mu_{r\,max}$ и имеющее меньшую H_c.

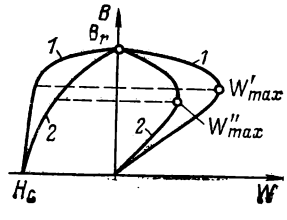


Рис. 16.15. К оценке влияния степени выпуклости размагничивающего участка МТМ на магнитную энергию

Таблица 16.2. **Сталь электротехническая нелегированная тонколистовая и ленты (ГОСТ 3836-83)***

Марка стали	H_c, А/м	$\mu_{max} \cdot 10^{-3}$	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м					
			B_{500}	B_{1000}	B_{5000}	$B_{10\,000}$	$B_{50\,000}$	$B_{80\,000}$
			не менее					
10895, 20895, 11895, 21895	95	3,0	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05
10880, 20880, 11880, 21880	80	4,0						
10864, 20864, 11864, 21884	64	4,5						
10848, 20848, 11848, 21848	48	4,8						
10832, 20832, 11832, 21832	32	5,0						

* Марки нелегированных электротехнических сталей расшифровывают следующим образом: первая цифра — класс по виду обработки (1 — горячекатаная, 2 — холоднокатаная, калиброванная); вторая цифра — тип по содержанию кремния (0 — сталь нелегированная, без нормирования коэффициента старения, 1 — сталь нелегированная с заданным коэффициентом старения — не более 6 А/м); третья цифра — группа по нормируемой характеристике (8 — коэрцитивная сила); четвертая и пятая цифры — значение нормируемой характеристики (H_C) в целых единицах А/м.

Таблица 16.3. **Сталь сортовая электротехническая нелегированная (ГОСТ 11036-75)**

Марка стали		Коэрцитивная сила в разомкнутой цепи, А/м	Магнитная индукция, в замкнутой цепи, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м		
Новое обозначение	Старое обозначение		B_{500}	B_{1000}	B_{2500}
10 895, 20 895, 11 895, 21 895	Э12	95	1,32	1,45	1,54
10 880, 20 880, 11 880, 21 880	Э10	80	1,36	1,47	1,57
10 864, 20 864, 11 864, 21 864	Э8	64	1,40	1,50	1,60

Таблица 16.4. **Свойства тонколистовой электротехнической холоднокатаной анизотропной стали (ГОСТ 21427.1-83)**

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более			Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м	
		$p_{1,0/50}$	$p_{1,5/50}$	$p_{1,7/50}$	100	2500
3311 (Э411)	0,80	4,0	—	—	—	1,75
3411 (Э310)	0,50	—	2,45	—	—	1,75
	0,35	—	1,75	—	—	1,75
3412 (Э320)	0,50	—	2,10	—	—	1,80
	0,35	—	1,50	—	—	1,80
3413 (Э330)	0,50	—	1,75	—	—	1,85
	0,35	—	1,30	—	—	1,85
	0,30	—	1,19	—	—	1,85
3414 (Э330А)	0,50	—	1,50	—	—	1,88
	0,35	—	1,10	—	—	1,88
	0,30	—	1,03	—	—	1,88
	0,27	—	1,03	—	—	1,85
3415	0,35	—	1,03	—	—	1,90
	0,30	—	0,97	—	—	1,90
	0,27	—	0,95	—	—	1,90
3404	0,35	—	—	1,60	1,60	—
	0,30	—	—	1,50	1,60	—
3405	0,35	—	—	1,50	1,61	—
	0,30	—	—	1,40	1,61	—
	0,27	—	—	1,38	1,61	—
3406	0,35	—	—	1,43	1,62	—
	0,30	—	—	1,33	1,62	—
	0,27	—	—	1,27	1,62	—
3407	0,35	—	—	1,36	1,68	—
	0,30	—	—	1,26	1,68	—
	0,27	—	—	1,20	1,68	—
3408	0,35	—	—	1,30	1,71	—
	0,30	—	—	1,20	1,71	—
	0,27	—	—	1,14	1,71	—

Таблица 16.5. **Свойства тонколистовой электротехнической холоднокатаной изотропной стали (ГОСТ 21427.2-83)**

Марка стали	Толщина мм	Удельные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция Тл при напряженности магнитного, поля, А/м	
		$p_{1,0/50}$	$p_{1,5/50}$	1000	2500
2011	0,65	3,8	9,0	1,48	1,60
(Э0100)	0,50	3,5	8,0	1,49	1,60
2012	0,65	3,6	8,0	1,50	1,62
	0,50	2,9	6,5	1,50	1,62
2013	0,65	3,1	7,0	1,53	1,64
	0,50	2,5	5,6	1,54	1,65
2014	0,50	2,2	5,0	1,52	1,62
2111 (Э100)	0,65	4,3	10,0	1,45	1,58
	0,50	3,5	8,0	1,46	1,58
2112	0,65	3,5	8,0	1,46	1,59
(Э1000АА)	0,50	2,6	6,0	1,46	1,60
2211	0,65	3,0	7,0	1,40	1,56
(Э1300)	0,50	2,6	5,8	1,40	1,56
2212	0,65	2,6	6,3	1,42	1,58
	0,50	2,2	5,0	1,42	1,60
2311 (Э2200)	0,65	2,5	5,8	1,36	1,52
	0,50	1,9	4,4	1,38	1,54
2312	0,65	2,4	5,6	1,38	1,54
	0,50	1,75	4,0	1,40	1,56
2411 (Э3100)	0,50	1,6	3,6	1,37	1,49
	0,35	1,3	3,0	1,37	1,50
2412	0,50	1,30	3,1	1,35	1,50
	0,35	1,15	2,5	1,35	1,50
2413	0,50	—	2,9	1,35	1,50
2421	0,35	—	2,0	1,35	1,50
	0,28			1,35	1,47
		$p_{0,75/400}$ 10,7	$p_{1,0/400}$ 19,5		

Для изготовления магнитопроводов асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт используют электротехнические стали с содержанием кремния до 0,4 % марок 2011, 2012, 2013 с толщиной ленты 0,5 и 0,65 мм. Магнитная индукция при изменении напряженности поля от 2500 до 30 000 А/м изменяется в пределах 1,48—2,05 Тл. Потери на частоте 50 Гц составляют для стали 2011 — 3,5 Вт/кг, для стали 2012 — 2,9 Вт/кг при магнитной индукции 1 Тл. С увеличением B они соответственно возрастают до 8,0 и 6,5 Вт/кг.

Механические напряжения, возникающие в результате обработки этих материалов, в значительной степени ухудшают магнитные свойства. Внутренние напряжения, возникающие после обработки, снимают отжигом при 830 °С. При необходимости получения особо высоких магнитных свойств термообработку проводят в вакууме при высокой температуре.

Для получения материалов с большим удельным сопротивлением и большой относительной магнитной проницаемостью при индукции 1,2—1,7 Тл используют легирование железа кремнием от 0,4 до 5 %. Железокремнистая сталь (электротехническая сталь) нашла применение при изготовлении магнитопроводов электрических машин, силовых трансформаторов и коммутирующей аппаратуры силовых электрических цепей *. При изготовлении магнитопроводов указанной аппаратуры необходимо учитывать анизотропию свойств некоторых материалов, обладающих кристаллографической и магнитной текстурой, приводящей к тому, что кривая намагничивания вдоль направления прокатки идет значительно круче, чем в направлении, перпендикулярном прокатке [16.5]. Основные свойства различных марок электротехнической стали, регламентируемые ГОСТ 21427.1-83—21427.3-83 [16.6], приведены в табл. 16.4—16.6.

Для изготовления магнитопроводов силовых трансформаторов применяют горячекатаные электротехнические стали 1511, 1512, 1513, 1514 и холоднокатаные текстурованные стали 3411, 3412, 3413, 3414, 3415. Удельное сопротивление их составляет примерно $60 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. В настоящее время холоднокатаные стали вытесняют стали, изготовленные горячей прокаткой. Это происходит из-за более высоких магнитных свойств холоднокатаных сталей. Кроме того, более гладкая поверхность последних позволяет увеличить коэффициент заполнения объема до 98 %, а изготовление ее в рулонах облегчает автоматизацию процессов резки, штамповки и измерения магнитных характеристик. Более высокая стоимость холоднокатаных сталей компенсируется значительным уменьшением потерь холостого хода, снижением общей массы готовых изделий из них.

Следует заметить, что для электрических машин, турбо- и гидрогенераторов большой мощности с массивными магнитопроводами основным магнитным материалом остаются, однако, горячекатаные стали 1511—1514. Сравнительные характеристики (зависимость амплитуды индукции от действующего значения напряженности поля, зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции) описанных горячекатаных и холоднокатаных сталей приведены на рис. 16.16 и 16.17. Для магнитопроводов синхронных и асинхронных

Таблица 16.6. **Свойства тонколистовой электротехнической горячекатаной изотропной стали (ГОСТ 21427.3-75)**

Марка стали	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м				
		$p_{1,0/50}$	$p_{1,5/50}$	1000	2500	5000	10 000	30 000
1211 (Э11)	1,00	5,8	13,4	—	1,53	1,63	1,76	2,00
	0,50	3,3	7,7	—	1,53	1,64	1,76	2,00
1212 (Э12)	1,00	5,4	12,5	—	1,53	1,62	1,76	2,00
	0,65	3,4	8,0	—	1,50	1,62	1,75	1,98
	0,50	3,1	7,2	—	1,50	1,62	1,75	1,98
1213 (Э13)	1,00	4,7	10,7	—	1,50	1,62	1,75	1,98
	0,65	3,2	7,5	—	1,50	1,62	1,75	1,98
	0,50	2,8	6,5	—	1,50	1,62	1,75	1,98
1311 (Э21)	0,50	2,5	6,1	—	1,48	1,59	1,73	1,95
1312 (Э22)	0,50	2,2	5,3	—	1,48	1,59	1,73	1,95
1313	0,50	2,1	4,6	—	1,48	1,59	1,73	1,95
1411 (Э31)	0,50	2,0	4,4	—	1,46	1,57	1,72	1,94
	0,35	1,6	3,6	—	1,46	1,57	1,71	1,92
1412 (Э32)	0,50	1,8	3,9	—	1,46	1,57	1,71	1,92
	0,35	1,4	3,2	—	1,46	1,57	1,71	1,92
1413 (Э33)	0,50	1,55	3,5	—	1,48	1,59	1,73	1,94
	0,35	1,35	3,0	—	1,48	1,59	1,73	1,94
1511 (Э41)	0,50	1,55	3,5	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90
	0,35	1,35	3,0	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90
1512 (Э42)	0,50	1,40	3,1	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89
	0,35	1,20	2,8	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89
1513 (Э43)	0,50	1,25	2,9	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
	0,35	1,05	2,5	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
1514 (Э43А)	0,50	1,15	2,7	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
	0,35	0,90	2,2	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89

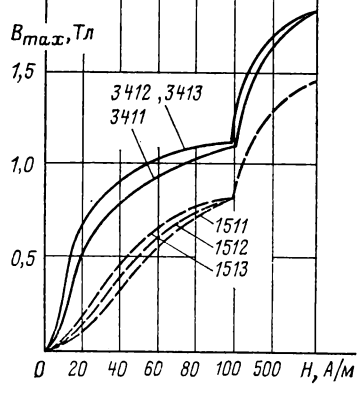


Рис. 16.16. Зависимость амплитуды индукции от действующего значения напряженности поля холоднокатаных и горячекатаных сталей

* Марки электротехнических сталей расшифровываются следующим образом: первая цифра — вид прокатки, структурное состояние (*1* — горячекатаная изотропная, *2* — холоднокатаная изотропная, *3* — холоднокатаная анизотропная); вторая цифра — содержание кремния (0—до 0,4%, 1 — от 0,4 до 0,8 %, 2 — от 0,8 до 1,8 %, 3 — от 1,8 до 2,8 %, 4 — от 2,8 до 3,8 %, 5 — от 3,8 до 4,8 %); третья цифра—группа по основной нормируемой характеристике (0 — удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл на частоте 50 Гц, 1 — удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл на частоте 50 Гц, 2 — удельные потери при магнитной индукции 1 Тл на частоте 400 Гц, 6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м; 7 — магнитная индукция при напряженности поля 10 А/м); четвертая цифра — порядковый номер типа стали.

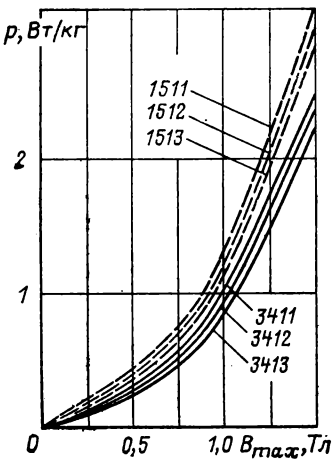


Рис. 16.17. Зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции холоднокатаных и горячекатаных сталей

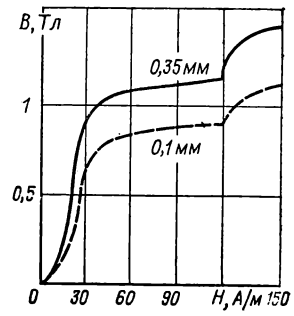


Рис. 16.18. Основные кривые намагничивания сплава марки 45Н

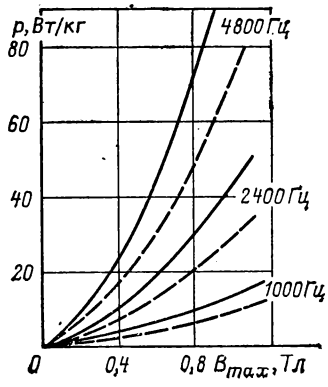


Рис. 16.19. Зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции сплава марки 50Н для различных частот:

——— — толщина ленты 0,1 мм;
— — — — толщина ленты 0,05 мм

машин и машин постоянного тока мощностью более 100 кВт применяют также горячекатаные стали 1311, 1411 и холоднокатаные стали 2411, 2412. Удельные сопротивления их составляют соответственно $40 \cdot 10^{-8}$ и $50 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

При изготовлении магнитных систем электрических машин мощностью до 100 кВт применяют слаболегированные горячекатаные стали 1211, 1212. Удельное сопротивление их ниже и находится в пределах $22 \cdot 10^{-8}$—30×10^{-8} Ом·м. Более высокой проницаемостью и более низкими потерями обладают холоднокатаные малотекстурованные стали 2211, 2212 по сравнению с горячекатаными той же степени легирования кремнием.

В силовых агрегатах, работающих на повышенных частотах (400 Гц и более), применяются тонколистовые материалы из горячекатаной стали 1521 и холоднокатаных текстурованных сталей марок 3421—3425 меньшей толщины. Уменьшение толщины ленты обусловлено необходимостью уменьшения потерь и малого снижения проницаемости при повышенных частотах работы материала (табл. 16.7, 16.8) [16.6, 16.7].

В магнитных цепях, работающих на переменном токе частот от 50 до нескольких тысяч герц в широком диапазоне изменения амплитуды индукции (0,01—1,5 Тл), используются, как правило, горячекатаные стали 1571, 1572 (табл. 16.9).

При работе магнитных материалов в диапазоне частот 50—5000 Гц с определенными допустимыми потерями в качестве замены текстурованных кремнистых сталей могут быть использованы более дорогие железоникелевые сплавы марок 50Н, 45Н. Основное применение они нашли в аппаратуре связи в качестве магнитопроводов малогабаритных трансформаторов питания, деталей магнитных цепей, работающих в повышенном диапазоне частот без подмагничивания, для изготовления различного типа магнитопроводов, в том числе трансформаторов тока и напряжения промышленной частоты. Магнитные параметры сплавов марок 50Н и 45Н приведены в табл. 16.10.

На рис. 16.18, 16.19 показаны основные кривые намагничивания сплава 45Н и зависимость потерь от максимальной магнитной индукции при различных частотах для сплава 50Н. Следует отметить, что имея высокие значения B_s и $\mu_{r\,max}$, низкое значение H_c, указанные материалы обладают очень серьезным недостатком — высокой чувствительностью магнитных свойств к механическим напряжениям.

Таблица 16.7. Магнитные свойства горячекатаной стали (ГОСТ 21427.3-75)

Марка	Толщина, мм	Магнитная индукция, Тл, при напряженности поля, А/м			Удельные потери, Вт/кг	
		500	1000	2500	$p_{0,75/400}$	$p_{1,0/400}$
1521	0,35	1,21	1,30	1,44	10,7	19
	0,22	1,20	1,29	1,42	8,0	14,0
	0,2	1,20	1,29	1,42	7,2	12,5
	0,1	1,19	1,28	1,40	6	10,5

Таблица 16.8. **Магнитные свойства ленты холоднокатаной рулонной анизотропной стали. (ГОСТ 21427.4-78)**

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг		H_c, А/м, не более	Магнитная индукция, Тл, при напряженности поля, А/м					
		$P_{1,0/400}$	$P_{1,5/400}$		40	80	200	400	1000	2500
3421 (Э340)	0,20	—	—	27	0,50	0,85	1,10	1,35	1,45	1,70
	0,15	10,0	23,0	34	0,50	0,80	1,10	1,30	1,45	1,70
	0,08	10,0	22,0	36	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
	0,05	10,0	21,0	36	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
3422 (Э350)	0,15	9,0	20,0	32	0,60	0,95	1,25	1,40	1,55	1,75
	0,08	8,5	19,0	32	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
	0,05	8,5	19,0	36	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
3423 (Э360)	0,15	8,0	19,0	26	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,08	7,5	17,0	28	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
3423	0,05	—	17,0	—	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
3424 (Э360А)	0,15	—	18,0	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,08	—	16,0	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,05	7,5	16,0	32	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
3425	0,15	—	17,0	—	1,10	1,35	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,08	—	15,0	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,05	—	15,0	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82
3411	0,20	$P_{1,7/400}$ 2,2	1,5	28	0,50	0,85	1,10	1,35	1,45	1,70

Таблица 16.9. **Магнитные свойства горячекатаных сталей (ГОСТ 21427.3-75)**

Марка	Толщина, мм	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м							
		10	20	50	70	100	200	500	1000
1571	0,35	0,035	0,14	0,48	0,61	0,77	0,92	1,21	1,30
	0,20	0,03	0,10	0,38	0,58	0,66	0,90	1,18	1,29
1572	0,35	0,045	0,17	0,57	0,71	0,87	1,02	1,25	1,30
	0,20	0,04	1,14	0,48	0,62	0,74	0,92	1,20	1,29

Таблица 16.10. **Магнитные свойства сплавов с высокой магнитной проницаемостью и повышенной индукцией насыщения (ГОСТ 10160-75)**

Марка	Вид продукции	Толщина, диаметр, мм	Класс	$\mu_r \cdot 10^{-3}$	$\mu_{r\,max} \times 10^{-3}$	H_c, А/м	B_s, Тл
50Н	Холоднокатаные ленты	0,05—0,08	I	2,0	20	20	1,50
		0,10—0,15		2,3	25	16	1,50
		0,20—0,25		2,6	30	12	1,50
		0,35—0,50		3,0	35	10	1,50
		0,80—1,00		3,0	30	12	1,50
		1,50—2,50		2,8	25	13	1,50
	Горячекатаные листы	3—22	—	2,5	20	24	1,50
	Прутки	8—100	—	2,5	20	24	1,50
	Холоднокатаные ленты	0,10—0,15	II	3,0	30	14	1,50
		0,20—0,25		3,5	35	12	1,50
		0,35—0,50		4,0	45	10	1,50
		0,80—1,00		4,0	40	10	1,50
		1,50—2,00		3,0	35	12	1,50
		0,05—0,20	III	10	60	0,4	1,52
45Н	Холоднокатаные ленты	0,10—0,15	I	2,0	20	24	1,50
		0,20—0,25		2,5	23	20	1,50
		0,35—2,5		2,8	25	16	1,50
	Горячекатаные листы	3—22	—	2,0	18	24	1,50
	Прутки	8—100	—	2,0	18	24	1,50

16.4. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАБОТЫ В СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Магнитные материалы для элементов аппаратуры приема и передачи информации, магнитопроводов малогабаритных трансформаторов, дросселей, дефектоскопов, магнитных экранов и многих других элементов высокочувствительной аппаратуры, работающей в переменных полях высокой частоты, должны удовлетворять требованиям узкого гистерезисного цикла и большой крутизны $B(H)$ в слабых магнитных полях.

В отличие от силовых аппаратов, где основное внимание уделяется индукции и потерям на перемагничивание в области насыщения, здесь качество аппаратуры зависит от относительной магнитной проницаемости и потерь на начальном участке кривой намагничивания.

Из электротехнических сталей для этих целей получили распространение горячекатаные стали 1561, 1562, работающие в звуковом диапазоне частот с амплитудой индукции 10^{-4}—10^{-3} Тл (табл. 16.11).

На рис. 16.20 приведены зависимости максимальной индукции от действующего значения напряженности магнитного поля электротехнических сталей 1561, 1562 толщиной 0,2 мм, работающих на частотах 400 и 1000 Гц.

Ассортимент магнитных материалов, работающих на начальном участке технической кривой намагничивания, не ограничивается листовой электротехнической сталью. Широкое

Таблица 16.11. **Сталь электротехническая тонколистовая (ГОСТ 21427.3-75)**

Марка	Толщина листа, мм	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м		
		20	40	80
1561	0,35—0,2	$1{,}0\cdot10^{-4}$	$2{,}2\cdot10^{-4}$	$6{,}5\cdot10^{-4}$
1562	0,35—0,2	$1{,}2\cdot10^{-4}$	$3{,}0\cdot10^{-4}$	$7{,}5\cdot10^{-4}$

распространение получили здесь высоконикелевые пермаллои марок 79НМ, 80НХС, 76НХД, 77НДМ, содержащие соответственно 79, 80, 76 и 77 % никеля, легированные молибденом, ванадием, вольфрамом, хромом и медью (табл. 16.12). Легирование осуществляется с целью придания необходимой обрабатываемости изделий. На рис. 16.21, 16.22 приведены кривые намагничивания и зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля материалов, рекомендуемых для работы в слабых полях (79НМ, 80НХС), и пермаллоя 50НХС, значительно уступающего по магнитным характеристикам в данной области работ. Отметим, что каждый конкретный сплав применяется для работы на частоте, на которую он рассчитан. С ростом частоты проницаемость падает и тем сильнее, чем выше было ее значение в постоянном поле (рис. 16.23). Наряду с выпускаемыми согласно ГОСТ 10160-75 материалами для работы в слабых магнитных полях используются сплавы 76НХД, 80НХ, 80НМ, 77НМД, 77НВ, 83НФ, 81НМА, 72НМДХ. Сплавы 76НХД, 80НХ обладают повышенной температурной стабильностью максимальной проницаемости в интервале температур —60÷+60 °С. В аппаратуре особо высокой точности используются сплавы 80НМ, имеющие значения магнитной проницаемости в слабых полях 60—40 мГн/м. Характерным свойством сплава 77НМД является низкое отношение $\mu_{r\,max}$ и $\mu_{r\,н}$, что имеет существенное значение в аппаратуре высокой точности. Низким коэффициентом амплитудной нестабильности μ_r в малых полях, повышенным удельным сопротивлением обладают сплавы 83НФ и 77НВ. Эти показатели очень важны при изготовлении магнитопроводов высокочувствительной аппаратуры, работающей в переменных полях высокой частоты. Сплав 81НМА обладает повышенной деформационной стабильностью и практичестки нулевой магнитострикцией, поэтому основное применение нашел в аппаратуре, подвергающейся механическим воздействиям. Повышенным значением μ_r и низкой точкой Кюри (100—120 °С) обладает сплав 72НМДХ, нашедший применение в магнитостатических экранах с высокой степенью экранирования.

Особые требования предъявляются к материалам, работающим при очень высоких ча-

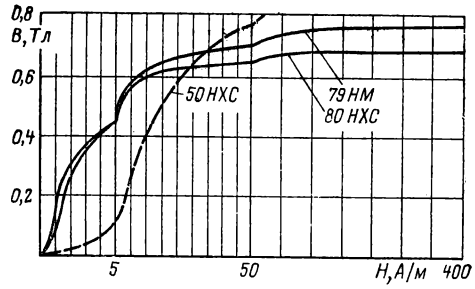


Рис. 16.21. Кривые намагничивания сплавов 79НМ, 80НХС, 50НХС

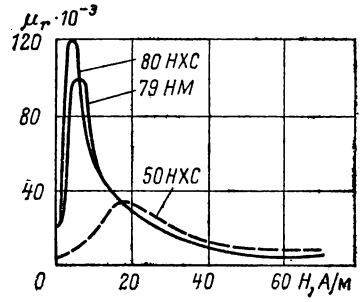


Рис. 16.22. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности поля сплавов 80НХС, 79НМ, 50НХС

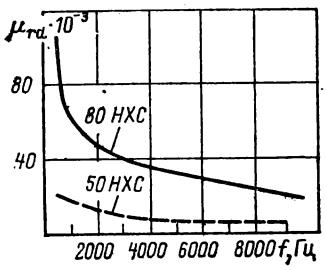


Рис. 16.23. Зависимость относительной магнитной проницаемости сплавов 50НХС и 80НХС от частоты

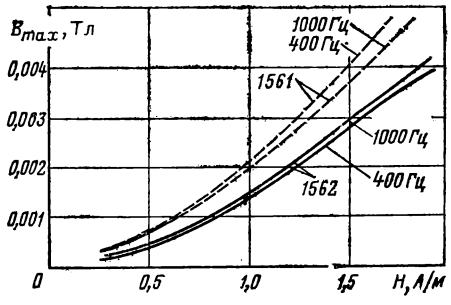


Рис. 16.20. Зависимость максимальной индукции от действующего значения напряженности поля сталей 1561, 1562 на частотах 400 и 1000 Гц

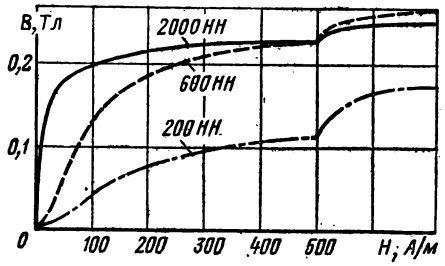


Рис. 16.24. Кривые намагничивания никель-цинковых ферритов 200НМ, 600НН, 2000НН

стотах. Эти материалы должны обладать большим электрическим сопротивлением, чтобы потери на вихревые токи были по возможности меньшими, а намагниченность устанавливалась с наибольшей скоростью. По своей природе такими материалами являются неметаллические магнитные материалы — ферримагнетики, к которым в первую очередь относятся ферриты. Удельное сопротивление их находится в пределах $5 \cdot 10^{-5}$—10^{8} Ом·м (у металлов 10^{-7} Ом·м) и в сильной степени, так же как и магнитные свойства, зависит от состава и структуры. Так, если у простых ферритов относительная начальная магнитная проницаемость не превышает 10, то у никель-цинковых ферритов можно получить $\mu_{r\,н} = 1000$ (табл. 16.13). На рис. 16.24 показаны кривые намагничивания никель-цинковых ферритов марок 200НН, 600НН, 2000НН. Очевидным является широкий диапазон изменения магнитной проницаемости в зависимости от марки большого многообразия этого типа ферритов. У марганцово-цинковых материалов (табл. 16.14) $\mu_{r\,н}$ достигает 3000. Общим их недостатком является сильная зависимость проницаемости от температуры. Одним из способов повышения температурной стабильности ферритов является добавление небольшого ко-

Таблица 16.12. Магнитные свойства сплавов с наивысшей магнитной проницаемостью в слабых полях (ГОСТ 10160-75)

Марка	Вид продукции	Толщина, диаметр, мм	$\mu_{r\,н} \cdot 10^{-3}$			$\mu_{r\,max} \cdot 10^{-3}$			H_c, А/м			B_s, Тл		
			кл. I	кл. II	кл. III	кл. I	кл. II	кл. III	кл. I	кл. II	кл. III	кл. I	кл. II	кл. III
79НМ	Холоднокатаные ленты	0,005	7	10	—	30	35	—	8,0	6,4	—	0,75	0,73	—
		0,01	14	16	20	60	90	120	5,6	3,2	2,4	0,75	0,73	0,73
		0,02	16	20	25	70	100	150	4,0	2,4	1,6	0,75	0,73	0,73
		0,05	16	20	30	90	120	200	3,2	1,6	1,2	0,75	0,73	0,73
		0,08	16	20	—	90	120	—	3,2	1,6	—	0,75	0,73	—
		0,1	20	22	30	120	150	200	2,4	1,2	1,2	0,75	0,73	0,73
		0,15	20	22	—	120	150	—	2,4	1,2	—	0,75	0,73	—
	Холоднокатаные листы и ленты	0,20—0,25	22	25	30	130	180	220	1,6	1,2	1,0	0,75	0,73	0,73
		0,35—1,0	25	30	—	150	220	250	1,6	1,0	1,0	0,75	0,73	0,73
		1,5—2,0	22	25	—	130	180	—	1,6	1,6	—	0,75	0,73	—
		2,5	22	—	—	130	—	—	1,6	—	—	0,75	—	—
	Холоднотянутая проволока	0,05—0,1	5	—	—	40	—	—	6,4	—	—	0,75	—	—
	Горячекатаные листы	3—22	20	—	—	80	—	—	3,2	—	—	0,75	—	—
	Прутки	8—100	20	—	—	80	—	—	3,2	—	—	0,75	—	—
	Холоднокатаные ленты	0,005	8	—	—	30	—	—	8,0	—	—	0,63	—	—
		0,01	14	—	25	50	—	90	5,6	—	3,2	0,63	—	0,63
		0,02	18	22	30	70	100	120	4,0	3,2	1,6	0,63	0,63	0,63
		0,05—0,08	20	30	40	90	150	200	3,2	1,6	1,0	0,63	0,63	0,63
		0,10	22	32	45	120	160	200	2,4	1,2	1,0	0,63	0,63	0,63
		0,15	22	32	—	120	160	—	2,4	1,2	—	0,63	0,63	—
		0,20—0,15	28	35	—	130	160	—	1,6	1,2	—	0,63	0,63	—
		0,35—0,5	35	35	50	150	200	250	1,2	1,0	0,8	0,63	0,63	0,63
		0,8—1,0	20	—	—	170	—	—	1	—	—	0,63	—	—
		1,5—2,5	25	—	—	150	—	—	1,2	—	—	0,63	—	—
80НХС	Горячекатаные листы	3—22	20	—	—	70	—	—	3,2	—	—	0,63	—	—
	Прутки	8—100	20	—	—	70	—	—	3,2	—	—	0,63	—	—

Таблица 16.13. Основные параметры никель-цинковых ферритов

Марка	$\mu_{r\,н}$	$\mu_{r\,max} \times 10^{-3}$	H, А/м, при $\mu_{r\,max}$	ТК μ, 10^{-6} °С$^{-1}$ при 20—70 °С	H_c, А/м, при $H_{max} = 800$ А/м	B_r, Тл	ρ, Ом · м
2000НН	1800—2400	7,0	12	3—9	9	0,06	$1 \cdot 10^{6}$
1000НН	800—1200	3,0	32	5—15	30	0,083	20
600НН	500—800	1,6	56	6—15	40	0,17	10^{2}
400НН	350—500	0,8	80	5—15	68	0,087	10^{3}
200НН	130—250	0,3	160	4—10	96	0,096	10^{3}
100НН	80—120	1,7	120	5—45	67	0,20	10^{7}
150ВЧ	130—170	0,35	640	±4	24 ($H_{max} = 4000$ А/м)	0,17	10^{4}
100ВЧ	80—120	0,28	720	9	300	0,165	10^{4}
50ВЧ2	45—65	0,17	800	—1,0÷9,0	450	0,20	10^{6}
30ВЧ2	25—35	0,12	1200	±35	720	0,16	10^{5}
20ВЧ	18—28	0,05	1600	±10	650	0,046	10^{4}
300НН	280—350	0,6	240	35	96	0,13	10^{5}
200НН2	190—230	0,85	80	25	90	0,25	10^{6}
150НН1	135—160	—	—	—	80	0,29	10^{5}
90НН	80—95	—	—	—	220	0,29	10^{5}
60НН	50—65	0,54	560	50	320	0,30	10^{8}
55НН	50—70	—	—	—	540	0,24	10^{6}
35НН	27—35	—	—	—	720	0,28	10^{5}
10ВЧ1	9—14	0,4	3600	120	1700	0,78	10^{3}

Таблица 16.14. **Основные параметры марганцово-цинковых ферритов**

Марка	μ_{rH}	$\mu_{rmax} \times 10^{-3}$	H, А/м, при μ_{rmax}	ТКμ, 10^{-6} °С$^{-1}$ при 20—70 °С	H_c, А/м, при H_{max}=800 А/м	B_r, Тл	ρ, Ом·м
6000НМ	4800—8000	10	0,12	0,2—1,5	0,064	0,135	0,1
4000 НМ	3500—4800	7,0	0,16	0,5—1,5	0,11	0,14	0,5
3000НМ	2700—3500	5,2	0,24	1—2	0,096	0,10	0,5
2000НМ	1700—2500	3,5	0,20	−2 ÷ +4,5	0,17	0,10	0,5
1500НМ	1200—1700	3,0	0,32	−1,1 ÷ +7,0	0,21	0,15	0,5
1000НМ	800—1200	2,0	0,8	−0,5 ÷ +8,5	0,22	0,086	0,5
2000НМ1	1700—2500	3,5	0,32	−1,0 ÷ +1,0	0,21	0,10	5
1500НМ1	1200—1700	3,0	0,32	−0,1 ÷ +0,8	0,20	0,080	5
1500НМ2	1200—1700	3,0	0,32	−0,5 ÷ +0,8	0,26	0,030	5
1500НМ3	1200—1800	3,0	0,48	0 — 0,7	0,088	0,060	20
1000НМ3	800—1200	2,0	0,8	0 — 1,0	0,30	0,083	10
700НМ	550—850	2,0	0,2	−0,2 ÷ +1,2	0,40	0,17	20
4000НМС	3300	5,3	0,24	—	0,68	0,087	0,5
3000НС	2500	4,0	0,32	—	0,96	0,096	0,5
1100НМИ	1200	1,6	0,64	—	0,67	0,20	0,1

личества крупнозернистого феррита к основному цинковому с несколько меньшей точкой Кюри.

Увеличения магнитной проницаемости добиваются уменьшением магнитострикции, т. е. подбором смешанных ферритов с компонентами, обладающими магнитострикцией разного знака. Здесь же необходимо учитывать, что одновременно с увеличением проницаемости возрастает тангенс угла потерь. Поэтому следует учитывать конкретные требования, предъявляемые к материалу в том или ином случае.

Увеличить магнитную проницаемость можно также текстурированием ферромагнитных деталей. В этом случае феррит, раздробленный в мелкий порошок, прессуется в магнитном поле, приложенном в направлении предполагаемой текстуры. В результате получается деталь с требуемым направлением легкого намагничивания.

Обычно требованиями, определяющими выбор типа ферритов для этих целей, являются большая относительная начальная магнитная проницаемость, малый тангенс угла потерь δ, высокая добротность Q, большое электрическое сопротивление ρ. Так же, как и у металлических материалов, эти свойства в сильной степени определяются не только составом, но и технологией изготовления, температурой отжига, временем выдержки, атмосферой, в которой проводится отжиг, скоростью охлаждения и т. д.

Задолго до промышленного внедрения ферритов были разработаны магнитодиэлектрики как материалы, рассчитанные на работу при частоте выше 10 кГц. Практически невозможно установить границы применимости различных материалов, так как, например, даже на частотах выше 1 МГц наряду с ферритами можно использовать металлические материалы из тонкой ленты. На выбор оптимального материала влияют не только характеристики, но и технология изготовления деталей заданной формы, т. е. в конечном счете стоимость изготовления. С этой точки зрения наивыгоднейшими являются магнитодиэлектрики — материалы, состоящие из ферромагнитных частиц размерами от 1 до 100 мкм, разделенных изолирующим веществом (жидкое стекло, синтетические смолы). Из-за внутреннего размагничивания частиц уменьшаются потери на вихревые токи, слабо изменяется проницаемость в полях до 2000 А/м, обеспечиваются высокая стойкость к подмагничивающим полям, хорошая стабильность во времени и много других положительных факторов, трудно осуществляемых в материалах с другой структурой.

Наряду с карбонильным железом после открытия пермаллоев ведутся работы по изготовлению порошков из сплавов с высокой

Таблица 16.15. **Параметры магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа**

Марка	μ_{rH}	$\delta_г$, 10^{-5} м/А	$\delta_в$, 10^{-9} Гц$^{-1}$	$\delta_п \cdot 10^3$	ТКμ, 10^{-6} °С$^{-1}$ (−60 ÷ +100 °С)
Р-10	10—11	0,25—0,375	2—4	0,15—0,25	150—200
Р-20	10—11	0,20—0,30	0,5—3,5	0,05—0,1	100—150
Р-100	9—10	0,125—0,20	0,5—1,2	0,05—0,1	50—100
$П_С$	9,5	0,140	2	0,2	+50 ÷ −50

Таблица 16.16. **Параметры магнитодиэлектриков на основе альсифера**

Марка	μ_{rH}	$\delta_г$, 10^{-5} м/А	$\delta_в$, 10^9 Гц$^{-1}$	$\delta_п \cdot 10^3$	ТК μ, 10^{-6} °С$^{-1}$	
					20—70 °С	−60 ÷ +20 °С
ТЧ-90	82—96	8,5	1000	3	−600	300—800
ТЧ-60	55—65	6,2	250	2	−400	100—500
ТЧК-55	50—55	6,2	250	2	−150 ÷ +50	100—400
ВЧ-32	30—34	2,5	85	1,2	−250	200—350
ВЧК-22	20—24	1,5	12	1,2	−50 ÷ +50	150
ВЧ-22	20—24	1,5	12	1,2	−200	—

магнитной проницаемостью (молибденовый пермаллой). Широко распространены, например, сердечники из этого материала в США, где налажен их промышленный выпуск со стандартизированными значениями относительной проницаемости (125, 60, 36, 14) для своего диапазона частот (соответственно 15, 50, 75, 200 кГц).

В настоящее время работы по совершенствованию магнитодиэлектриков отошли на задний план в результате улучшения свойств ферритов. Повышение стабильности ферритов и снижение их чувствительности к внешним воздействиям (температура, время, подмагничивание) приводит к тому, что они полностью заменяют магнитодиэлектрики. Но хотя объем производства магнитодиэлектриков уменьшается, выпуск их еще продолжается ввиду простоты и низкой стоимости технологического процесса изготовления. Для этих материалов, работающих в области слабых полей, различают потери на гистерезис, вихревые токи и последействие (магнитную вязкость), характеризующиеся соответственно коэффициентами потерь $\delta_г$ (м/А), $\delta_в$ (1/Гц) и $\delta_п$ [16.2, 16.18]. Параметры магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа и альсифера, выпускаемых промышленностью, приведены соответственно в табл. 16.15, 16.16.

16.5. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА

В ряде устройств, например магнитных усилителях, бесконтактных реле, коммутационных дросселях, элементах вычислительной техники, требуются материалы с очень узким гистерезисным циклом, большим коэффициентом прямоугольности, высокой проницаемостью, низкой электрической проводимостью и большим коэффициентом квадратности. При этом для коммутационной аппаратуры магнитные материалы должны иметь большое значение B_r, резкий спад на петле магнитного гистерезиса, малую H_c, большую скорость изменения индукции.

От магнитных материалов для бесконтактных реле и запоминающих устройств требуются большой коэффициент прямоугольности $\alpha_п$, большое приращение индукции при перемагничивании и минимальное время переключения $t_в$.

Материалы, используемые в магнитных усилителях, должны обладать $\alpha_п$, близким к единице, а для обеспечения большего коэффициента усиления петля гистерезиса должна иметь крутой спад. Указанным требованиям удовлетворяют сплавы типа пермаллоя с кристаллографической (50НП, 47НМП) и магнитной (65НП, 68НМП, 37НКДП, 34НКМП) текстурой и прямоугольным циклом гистерезиса ($\alpha_п = 0{,}85 \div 0{,}98$) *. Индукция насыщения у них 1,2—1,5 Тл (табл. 16.17). На рис. 16.25 для сравнения приведены петли магнитного

Таблица 16.17. Магнитные свойства холоднокатаной ленты сплавов с прямоугольной петлей гистерезиса (ГОСТ 10160-75)

Марка	Толщина, мм	Класс	$\mu_{max} \times 10^{-3}$	H_c, А/м	B_r, Тл	$\alpha_п$ при 800 А/м
50НП	0,005	I	15	40	1,50	0,80
	0,01		20	32	1,50	0,83
	0,02		40	20	1,50	0,85
	0,05—0,1		40	18	1,50	0,85
	0,01	II	35	20	1,50	0,87
	0,02		60	15	1,50	0,92
	0,05—0,1		60	15	1,50	0,90
	0,01	III	60	15	1,52	0,91
	0,02		75	13	1,52	0,94
	0,05		80	11	1,52	0,94
34НКМП	0,005	I	15	80	1,50	0,90
	0,01		35	24	1,50	0,92
	0,02		40	16	1,50	0,90
	0,05		60	12	1,50	0,87
	0,1		100	8	1,50	0,85
	0,2—0,5		120	6,4	1,50	0,85
	0,01	II	40	16	1,50	0,92
	0,02		65	11	1,50	0,94
	0,05		75	10	1,50	0,92
	0,1		125	6,4	1,50	0,90
	0,2—0,5		180	6,4	1,50	0,90
35НКХСП	0,005	I	15	80	1,30	0,90
	0,01		30	24	1,30	0,85
	0,02		40	16	1,30	0,85
	0,05		60	12	1,30	0,85
	0,1		100	8	1,30	0,80
	0,2—0,5		120	6,4	1,30	0,80
	0,01	II	50	16	1,30	0,92
	0,02		80	8	1,30	0,92
	0,05		20	4,8	1,30	0,92
	0,1—0,5		30	4,0	1,30	0,02
40НКМП	0,01	I	100	6,4	1,35	0,93
	0,02		200	4,0	1,35	0,93
	0,05		300	3,2	1,35	0,92
	1,10		400	2,4	1,35	0,93
	0,01	II	200	4,8	1,35	0,94
	0,02		400	2,4	1,35	0,94
	0,05		500	1,6	1,35	0,94
	0,1		600	1,6	1,35	0,94
68НМП	0,02	I	100	8,0	1,15	0,90
	0,05		200	5,6	1,15	0,90
	0,1—0,2		220	4,0	1,15	0,90
	0,02	II	200	4,0	1,15	0,90
	0,05		400	3,2	1,15	0,92
	0,1—0,2		500	2,4	1,15	0,93
	0,02	III	300	3,2	1,15	0,92
	0,05		600	2,4	1,15	0,93
	0,1—0,2		800	1,6	1,15	0,93
65НП	0,02	I	70	6,4	1,30	0,90
	0,05		100	3,2	1,30	0,90
	0,10		200	2,8	1,30	0,90
	0,20		250	2,4	1,30	0,90
	0,35—0,5		300	2,4	1,30	0,90

* Первая цифра пермаллоевых сплавов указывает на процентное содержание никеля; буква П обозначает, что сплав имеет прямоугольную петлю гистерезиса. Средние буквы указывают на наличие легирующих элементов: М — молибден, Х — хром, К — кобальт и др.

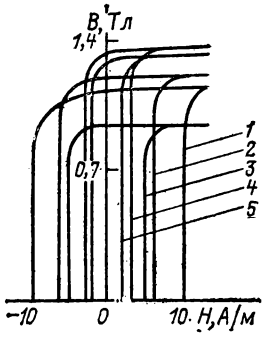


Рис. 16.25. Петли гистерезиса сплавов с ППГ: *1* — 50НП; *2* — 65НП; *3* — 34НКМП; *4* — 40НКМПЛ; *5* — 35НКХСП

гистерезиса ряда сплавов, обладающих различной степенью прямоугольности, достаточно широким диапазоном значений B_r и H_c. Наиболее освоенными промышленностью являются сплавы 50НП и 50НПУ с кубической текстурой, имеющие $\mu_{r\,max}=(3\div4)\,10^4$, $\alpha_п=0{,}85\div0{,}98$, $B_s=1{,}5\div1{,}6$ Тл и обеспечивающие наилучшие свойства при прохождении магнитного потока вдоль, поперек листа и перпендикулярно прокатке. За рубежом 50 %-ные сплавы никеля с кубической структурой распространены широко. Следует иметь в виду, что хотя эти сплавы хорошо поддаются обработке давлением, резке и сварке, они являются чувствительными к механическим напряжениям, которые могут приводить к необратимому ухудшению магнитных свойств. Преимущественное применение сплавы 50НП нашли в магнитопроводах магнитных усилителей, реакторов мощных механических выпрямителей, трансформаторов аппаратуры связи. Сплав с повышенной $\mu_{r\,н}$ применяется в качестве сердечников аппаратуры магнитной записи и особо точной аппаратуры связи.

Характерными особенностями сплавов 65НП, 68НМП, 37НКДП являются высокая $\mu_{r\,max}=(1\div5)\cdot10^5$, прямоугольная петля гистерезиса ($\alpha_п=0{,}9\div0{,}98$). Согласно ГОСТ 10994-74 [16.10] сплав 65НП в новых разработках применять не рекомендуется из-за большой частотной зависимости его магнитных свойств, высоких удельных потерь. Применяются сплавы этой подгруппы в основном для магнитопроводов бесконтактных магнитных элементов высокой чувствительности и точности.

Более высоким удельным сопротивлением при прочих равных условиях обладают сплавы 34НКМП, 35НКХСП, 40НКМПЛ. Этим материалам свойственна одноосная анизотропия, обеспечивающая наивысший уровень магнитных свойств вдоль указанной оси. Широкое применение сплавы этой подгруппы нашли в магнитопроводах бесконтактных магнитных элементов высокой чувствительности, работающих при повышенных частотах.

Для изготовления магнитопроводов магнитных усилителей используются сплавы 77НМДП, 79НМ, 80Н2М (толщина ленты 0,01—0,02 мм), обладающие относительно высокими значениями $\mu_{r\,max}\approx(5\div10)\cdot10^4$, коэффициентом прямоугольности $\alpha_п=0{,}7\div0{,}85$, малым коэффициентом переключения (см. ниже) в импульсных полях $S_w=30\div140$ А·мкс/м (табл. 16.18).

Таблица 16.18. Магнитные свойства сплавов толщиной 0,003 мм с прямоугольной петлей гистерезиса (ГОСТ 10160-75)

Марка сплава	Вид продукции	H_c, А/м	B_r, Тл	$\alpha_{п}$ при $5H_c$
79НМП	Холоднокатаные ленты	9,6	0,6	0,90
77НМДП	То же	7,2	0,5	0,90

Для изготовления малогабаритных ленточных магнитопроводов переключающих устройств (логические элементы, регистры сдвига, триггерные схемы) применяются сплавы микронных толщин (0,5—1 мкм). Высокой прямоугольностью петли гистерезиса и малым временем перемагничивания в импульсных полях обладают типовые сплавы 79НМ и 77НМД и специально разработанные сплавы для тончайших лент 80Н2М и 80НЮ [16.12]. Контролируемыми параметрами в постоянных полях у них являются: максимальная индукция B_{max}, соответствующая H_{max}, остаточная индукция B_r, коэрцитивная сила H_c, коэффициент прямоугольности $\alpha_п$, коэффициент «старта» $H_{ст}/H_c$, коэффициент «финиша» $H_ф/H_c$. Напряженности поля старта $H_{ст}$ и финиша $H_ф$ определяются, как показано на рис. 16.26. Свойства сплавов в импульсных полях характеризуются временем перемагничивания (коэффициентом переключения S_w) и пороговым полем H_0, определяемыми по характеристике $1/t_s=f(H_и)$, где t_s — время перемагничивания; $H_и$ — напряженность импульсного поля (рис. 16.27). Связь указанных величин определяется выражением

$$S_w = t_s\,(H_и - H_0) = \operatorname{ctg}\varphi.$$

Основные свойства указанных сплавов приведены в табл. 16.19.

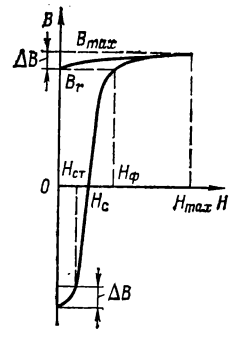


Рис. 16.26. Характеристики и параметры магнитных материалов в импульсном режиме перемагничивания

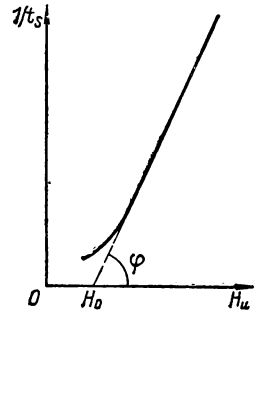


Рис. 16.27. К определению порогового поля импульсных сердечников

Таблица 16.19. Нормируемые магнитные свойства сплавов микронных толщин

Марка	Толщина, мкм	H_c, А/м	$H_ф/H_c$	B_r, Тл	$\alpha_п$, %	$H_{ст}/H_c$	S_w, А мкс/м
		не более		не менее			
79НМ	3	9,6	—	0,6	90	—	—
77НМД	30	7,2		0,5	90	—	—
80Н2М	20	24	2,0	—	93	0,8	32

Таблица 16.20. Состав и физические свойства аморфных МММ

Состав сплава	Точка Кюри, °С	$\mu_0 M_s$, Тл	B_r, Тл	$\frac{M_r}{M_s}$	H_c, А/м	$M_{rmax} \times 10^{-3}$	ρ, мкОм·м
В состоянии поставки	580	1,42	0,60	0,42	8	130	1,35
После отжига при 330 °С в поле 320 А/см			1,30	0,95	1,8	180	—
В состоянии поставки	—	0,70	0,23	0,35	1	130	1,34
После отжига при 150 °С в поле 320 А/см			0,57	0,36	0,6	960	—
45НПР-А в состоянии поставки	—	0,75	0,40	0,5	3	600	1,40

По мере уменьшения толщины ленты наблюдается увеличение H_c, $\alpha_п$ и R_s, а также уменьшение $\mu_{r\,в}$ и $\mu_{r\,max}$ (рис. 16.28).

Перспективными для изготовления магнитных элементов памяти ЭВМ являются аморфные высокопроницаемые магнитно-мягкие сплавы. Физические свойства трех близких к практическому применению сплавов приведены в табл. 16.20.

Сплав 45НПР-А разработан в ЦНИИЧМ и изготавливается в виде ленты толщиной 30 мкм и шириной 2—3 мм. По магнитным свойствам этот сплав близок к высоконикелевым пермаллоям и в то же время допускает механическую обработку без ухудшения магнитных параметров. Термомагнитная обработка сплава 45НПР-А в 2—3 раза снижает H_c и увеличивает μ_r.

В общем случае магнитно-мягкие аморфные ленты могут быть рекомендованы для изготовления из них магнитопроводов миниатюрных высокочастотных трансформаторов, магнитных головок записи и воспроизведения, гибких магнитных экранов и других подобных изделий.

Значительно позже металлических материалов появились ферриты с ППГ. Однако объем их внедрения из экономических соображений в настоящее время превзошел производство металлических сплавов. Высокое

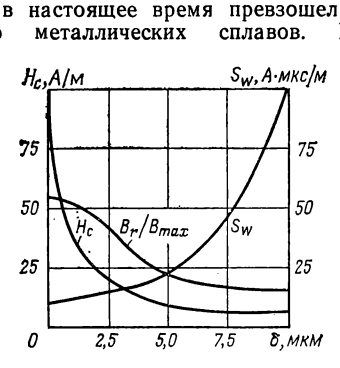


Рис. 16.28. Зависимость коэффициента прямоугольности, коэффициента переключения и коэрцитивной силы ленточных сердечников от толщины ленты

Таблица 16.21. Основные параметры ферритов с ППГ

Марка	Коэрцитивная сила H_c, А/м	B_r, Тл	$H_{ст}/H_c$	ТК H_c, °С$^{-1}$ при 20—70 °С
0,12ВТ	9,6±15 %	0,2±15 %	0,7	0,013
0,16ВТ	12,8±15 %	0,2±15 %	0,72	0,012
0,27ВТ	21,6±15 %	0,2±15 %	0,72	0,013
0,3ВТ	24±15 %	0,21±15 %	0,7	0,008
0,37ВТ	29,6±15 %	0,14±15 %	0,7	0,01
0,44ВТ	35,2±15 %	0,16±15 %	0,7	0,008
0,7ВТ	56±15 %	0,23±15 %	0,7	0,007
0,9ВТ	72±10 %	0,25±15 %	0,8	0,006
1,3ВТ	104±10 %	0,23±15 %	0,8	0,006
1,5ВТ	120±10 %	0,22±15 %	0,75	0,005
1,7ВТ	140±10 %	0,21±15 %	0,75	0,005
2ВТ	160±10 %	0,18±15 %	0,8	0,006

удельное сопротивление дает возможность изготовления ферритовых деталей в виде монолита. Низкая индукция насыщения ферритов не играет существенной роли при использовании их в запоминающих устройствах с ферромагнетиками. Ограничением является низкая точка Кюри и, как следствие, большая температурная нестабильность магнитных свойств. Наибольшее распространение получили ферриты на основе системы $MgO \cdot MnO \cdot Fe_2O_3$.

В табл. 16.21 приведены основные статические параметры нормализованных марок ферритов с ППГ.

Вспомогательные (справочные) параметры этих же марок ферритов, которые используются при выборе материала для конкретных целей, приведены в табл. 16.22.

Основным видом изделий из ферритов с ППГ, выпускаемых промышленностью, являются тороидальные магнитопроводы. Рекомендации по выбору материала магнитопровода весьма условны из-за большого разнообразия устройств и требований к ним. Как правило, для магнитопроводов запоминающих устройств рекомендуется использовать высококоэрцитивные ферриты марок 0,9Вт; 1,3 ВТ; 1,5ВТ; 1,75 ВТ; 2ВТ (число в начале обозначения соответствует коэрцитивной силе в эрстедах). Объяс-

Таблица 16.22. Вспомогательные параметры ферритов с ППГ

Марка	$\alpha_п$	ТК $H_{ст}$, °С$^{-1}$		ТК B_r, 10^{-2} °С$^{-1}$		Точка Кюри, °С, не менее	H_0, А/см	S_w, А·мкс/м не более	ρ, Ом·м
		−60 ÷ +20 °С	+20 ÷ 70 °С	−60 ÷ +20 °С	+20 ÷ +70 °С				
0,12ВТ	0,91	0,02	0,018	55	74	115	0,56	28	$6\cdot10^4$
0,16ВТ	0,93	0,018	0,012	45	60	135	0,56	40	$5\cdot10^2$
0,27ВТ	0,90	0,02	0,014	60	65	110	0,40	36	$2\cdot10^3$
0,3ВТ	0,93	0,01	0,009	40	45	150	0,96	48	—
0,37ВТ	0,93	0,014	0,01	40	45	145	0,96	48	$1\cdot10^6$
0,44ВТ	0,93	0,01	0,009	35	35	180	1,44	44	$2\cdot10^2$
0,7ВТ	0,93	0,01	0,007	25	30	240	1,6	44	$2\cdot10^2$
0,9ВТ	0,92	0,008	0,006	25	25	235	1,36	48	$2\cdot10^2$
1,3ВТ	0,91	0,008	0,007	25	25	250	1,6	52	$25\cdot10^2$
1,5ВТ	0,91	0,007	0,006	25	30	250	1,72	52	$5\cdot10^2$
1,75ВТ	0,90	0,007	0,006	20	25	270	2,0	48	$1\cdot10^3$
2ВТ	0,90	0,007	0,006	30	30	260	2,08	44	$5\cdot10^4$

Таблица 16.23. Параметры термостабильных ферритовых микросердечников

Марка	H_c, А/м	B_r, Тл	S_w, А·мкс/м	$\alpha_п$
М100П	175	0,23—0,25	40—60	0,91—0,92
М101П	190	0,23—0,24	35—55	0,90—0,92
	260			
	360			
М102П	130	0,2	70	0,90—0,92

няется это стремлением повысить быстродействие за счет уменьшения времени перемагничивания t_s. Поскольку коэффициент переключения S_w для всех ферритов одинаков, а H_c незначительно отличается от H_0, то согласно выражению

$$t_s = \frac{S_w}{H - H_0}$$

время перемагничивания уменьшается с увеличением H_c.

В последние годы разработаны новые термостабильные ферриты с ППГ для микромагнитопроводов, практически не изменяющие свои параметры в диапазоне температур −60÷+80 °С (табл. 16.23).

16.6. МАГНИТНО-МЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В телефонии, измерительной технике и радиотехнике часто требуются материалы с постоянной проницаемостью при малых намагничивающих полях, высоким приращением магнитной индукции при однополярном намагничивании, с повышенными значениями проницаемости и удельного сопротивления, высокой индукцией насыщения. Материалы эти нашли широкое применение для сердечников катушек постоянной индуктивности, дросселей фильтров, широкополосных и импульсных трансформаторов, аппаратуры связи звуковых и высоких частот, магнитопроводов трансформаторов питания, магнитных усилителей, сердечников и полюсных наконечников электромагнитов.

Магнитные свойства некоторых сплавов (перминвары, изопермы) с постоянной μ_r в диапазоне до 10^4 А/м приведены в табл. 16.24.

Большое распространение для изготовления импульсных и широкополосных трансформаторов получили ферриты 1500НМ1, 1000НМ3, 1100НМИ, 1000ННИ, 350ННИ, 300ННИ и сплавы 79Н3М и 68НМ, обладающие высокими значениями проницаемости и приращений индукции при однополярном намагничивании, малым отношением B_r/B_s. Параметры используемых ферритов и сплавов для импульсных трансформаторов приведены соответственно в табл. 16.25, 16.26. На рис. 16.29 приведены петли гистерезиса сплавов 79Н3М и 69НМ при различных режимах термообработки [16.11].

Особые требования предъявляются к материалам для реле. Здесь необходимо иметь высокую индукцию насыщения для надежного срабатывания; низкую B_r, а следовательно, и H_c для надежного отпускания; высокое удельное сопротивление для снижения времени срабатывания. Хотя совместить все требования в

Таблица 16.24. Магнитные свойства холоднокатаной ленты сплавов с низкой остаточной индукцией и постоянством магнитной проницаемости (ГОСТ 10160-75)

Марка	Толщина, мм	$\mu_{rн}$ кл. I	$\mu_{rн}$ кл. II	$\frac{\mu_{rmax}}{\mu_{rн}}$	$\alpha_п$ при 800 А/м	ТКμ, 10^{-2} °С$^{-1}$ (−60 ÷ +120 °С)
47НК	0,01—0,1	900	1100	1,15	0,05	0,06
47НКХ	0,02—0,1	1500	—	1,2	0,05	0,03
64Н	0,01—0,1	2500	2200	1,2	0,07	0,06
40НКМ	0,01—0,1	1800	—	1,2	0,07	—

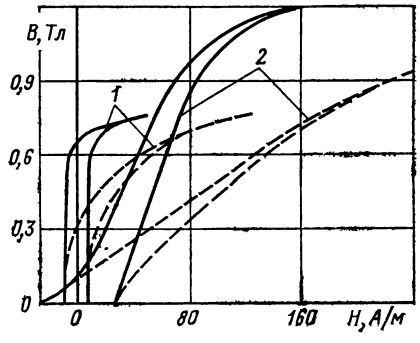


Рис. 16.29. Петли гистерезиса сплавов марок 79Н3М (*1*) и 68НМ (*2*) при различных режимах термообработки:

——— — быстрое охлаждение; — — — — медленное охлаждение

Таблица 16.25. **Электромагнитные параметры ферритов для импульсных трансформаторов**

Марка	Относительная импульсная проницаемость $\mu_{ги}$ при τ=3 мкс, f=5 кГц	Изменение $\mu_{ги}$, % в интервале температур —60÷+85 °С	Рекомендуемый режим работы		
			$H_и$, А/м	f, МГц, не более	$t_з$, мкс, не менее
1500НМ1	1700	±20	80	0,1	1,0
1000НМ3	1400	±15	80	0,1	1,0
1100НМИ	1100	±15	80	0,1	1,0
1000ННИ	1000	0÷+30	64	1	0,1
350ННИ	360	+30÷—45	80	1	0,1
300ННИ	300	±30	80—240	1	0,1
300ННИ1	300	±10	80	1	0,1

Таблица 16.26. **Магнитные параметры холоднокатаной ленты сплавов с высокой магнитной проницаемостью при однополярном намагничивании (ГОСТ 10160-75)**

Марка	Толщина, мм	Относительная импульсная проницаемость $\mu_{ги} \cdot 10^{-3}$		$\alpha_п$ при 800 А/м	ТК $\mu_{ги}$, 10^{-4} °С$^{-1}$, в интервале —60÷+60 °С
		при 20 А/м	при 80 А/м		
79НЗМ	5	5	—	0,45	25
	10	7	—	0,30	25
	20	8	—	0,25	25
68НМ	20	—	6	0,20	25

одном материале трудно, широкое распространение здесь нашли сплавы 50НХС. Магнитные свойства сплава на этой основе приведены в табл. 16.27.

При построении магнитных систем микрофонов, магнитоэлектрических приборов, осциллографов и т. п. используется материал, называемый пермендюром. Индукция насыщения этого материала составляет 2,4 Тл. Отличительной особенностью пермендюра является то, что уже при 500—1000 А/м индукция в нем значительно превосходит индукцию всех других материалов (см. рис. 16.5). Магнитные свойства материалов с высокой индукцией насыщения регламентируются ГОСТ 10160-75 (табл. 16.28).

Таблица 16.27. **Магнитные параметры холоднокатаной ленты сплава 50 НХС (ГОСТ 10160-75)**

Класс	Толщина, мм	$\mu_{гн} \times 10^{-3}$	$\mu_{r\,max} \times 10^{-3}$	H_c, А/м	B_s, Тл
I	0,005	1,0	8	56	1,00
	0,01	1,3	10	40	1,00
	0,02	1,5	15	20	1,00
	0,05—0,08	2,0	20	16	1,00
	0,1—0,15	2,5	25	13	1,00
	0,2—0,25	3,0	28	10	1,00
	0,35—0,5	3,2	30	8	1,00
	0,8—1	3,0	20	10	1,00
II	0,02—0,05	3,0	25	12	1,00
	0,1—0,25	3,1	28	10	1,00
	0,35—0,5	3,5	35	8	1,00

Для некоторых случаев требуются термозависимые магнитные материалы. Например, при изменении температуры изменяется индукция постоянных магнитов в измерительных приборах, счетчиках. В результате неизбежны искажения показаний этих приборов. Для компенсации температурной погрешности в этих случаях постоянный магнит шунтируется термомагнитным сплавом. Хорошими термомагнитными свойствами обладают сплавы никеля с медью (30—40 % Cu, остальное — никель), называемые кальмаллоями. Характерной особенностью для термомагнитных сплавов является линейная зависимость индукции от температуры. На рис. 16.30 представлена зависимость (B—$\mu_0 H$) сплава 32НХЮ (ТУ 14-1-331-72

Таблица 16.28. **Магнитные свойства холоднокатаных сплавов с высокой индукцией технического насыщения (ГОСТ 10160-75)**

Марка	Вид продукции	Класс	Толщина или диаметр, мм	Индукция, Тл, при напряженности поля, А/м			Удельные потери, Вт/кг			H_c, А/м	μ_r
				400	2500	15 000	$p_{1,5/400}$	$p_{1,8/400}$	$p_{2,0/400}$		
27КХ	Листы и ленты	I	0,2	—	1,8	2,15	80	—	—	—	—
			0,35	—	1,8	2,15	110	—	—	—	—
			0,7	—	1,8	2,15	—	—	—	—	—
	Прутки и поковки		75—100	—	1,75	2,05	—	—	—	—	—
49К2ФА	Ленты и листы	I	0,1	—	2,2	—	—	—	—	140	5500
			0,2	—	2,2	—	—	—	—	120	5500
		II	0,05	1,8	2,1	—	—	25	30	40	—
			0,1	1,8	2,2	—	—	35	45	80	—
			0,15—0,2	1,85	2,2	—	—	39	55	48	—
			0,25—0,7	1,85	2,2	—	—	—	—	48	—
		III	0,1	2,0	2,2	—	—	25	30	30	—
49КФ	Прутки и поковки	I	10—80	—	1,9	2,1	—	—	—	160	—
		II	10—80	—	2,0	2,2	—	—	—	160	—
49К2Ф	Ленты и листы	I	0,2	—	—	2,25	—	—	—	160	—
		II	0,2	—	—	2,25	—	—	—	160	700 при 0,8 А/м

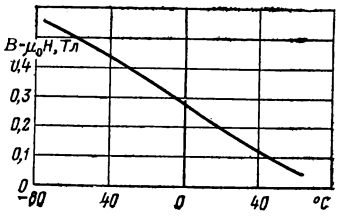


Рис. 16.30. Усредненная термомагнитная характеристика сплава 32НХЮ

[16.12]) от температуры при напряженности постоянного магнитного поля 6000—16 000 Ам/м.

Для получения мощных механических колебаний звуковой и ультразвуковой частот используются магнитострикционные материалы. На их основе строятся магнитострикционные генераторы, элементы ультразвуковой аппаратуры в гидроакустике, линии задержки, приборы для определения глубины моря (эхолот),

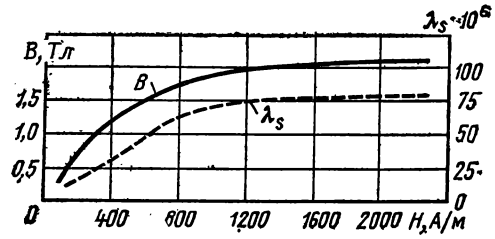


Рис. 16.31. Усредненные зависимости индукции и коэффициента магнитострикции от напряженности магнитного поля сплава 50КФ

механические дробилки и др. Основным магнитным материалом здесь является сплав железа с 14 % алюминия, никель и сплав на основе Fe—Co (50 % Co). Марки магнитострикционных сплавов НП-2-Т, 50ЕФ, 14НЮ регламентируются техническими условиями [16.12]. На рис. 16.31 представлены усредненные зависимости индукции B и коэффициента магнитострикции λ_s от напряженности магнитного поля сплава 50КФ.

16.7. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Магнитно-твердые материалы после намагничивания должны создавать внешние постоянные поля, по возможности нечувствительные к различным возмущающим факторам. Необходимыми условиями здесь являются высокие значения остаточной индукции, коэрцитивной силы, малая проницаемость возврата и большой коэффициент выпуклости. Одним из основных оценочных критериев качества МТМ является энергетическое произведение $(BH)_{max}$, зависящее как от B_r и H_c, так и от характера кривой размагничивания, оцениваемого коэффициентом выпуклости β:

$$\beta = \frac{(BH)_{max}}{B_r H_c}.$$

В существующих технических МТМ этот коэффициент находится в пределах 0,25—0,75. Поведение материала в динамическом режиме работы характеризует относительная проницаемость возврата, определяемая как тангенс угла наклона к оси H прямой, соединяющей вершины цикла возврата (см. рис. 16.4). Чем больше $\mu_{rвозв}$, тем чувствительнее материал к дестабилизирующим факторам.

Основной целью при разработке МТМ является повышение удельной магнитной энергии, позволяющей при прочих равных условиях значительно уменьшать объем и массу конструктивных элементов различных устройств.

Большое распространение для изготовления постоянных магнитов получили литые сплавы на основе системы Fe—Al—Ni—Co (типа ЮНДК), имеющие $H_c = 40 \div 200$ кА/м и $(BH)_{max} = 7 \div 80$ кДж/м³ при $B_r = 1{,}35 \div 0{,}65$ Тл. На рис. 16.32—16.34 приведены кривые размагничивания различных марок сплавов этого типа. Зарубежными аналогами являются сплавы типа альнико, тикональ и альни. Сплавы являются дисперсионно-твердеющими. Высокая H_c обеспечивается малыми размерами кристаллов (близкими к однодоменным) и высокой анизотропией формы их. Магниты из этих сплавов применяются в электродвигателях, электроизмерительных, радиотехнических и других приборах. В табл. 16.29, 16.30 приведены параметры МТМ на железоникельалюминиевой основе и прутков из легированной магнитно-твердой стали согласно ГОСТ 17809-72 и ГОСТ 6862-71 [16.12, 16.13].

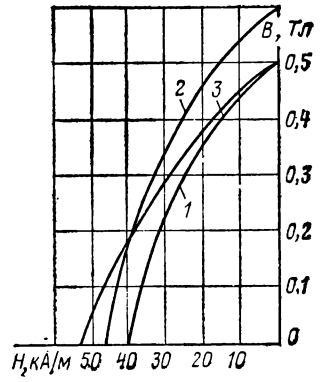


Рис. 16.32. Кривые размагничивания магнитно-твердых материалов:
1 — ЮНД4; *2* — ЮНД8; *3* — ЮНД12

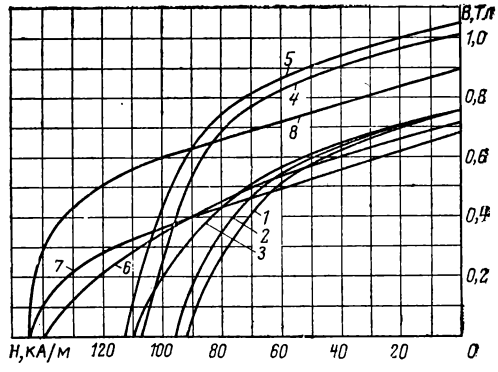


Рис. 16.33. Кривые размагничивания магнитно-твердых сплавов:
1 — ЮНДК35Т5; *2* — ЮНДК35Т5АА; *3* — ЮНДК35Т5; *4* — ЮНДК35ТБА; *5* — ЮНДК35Т5АА; *6* — ЮНДК38Т7; *7* — ЮНДК40Т8; *8* — ЮНДК40Т8АА

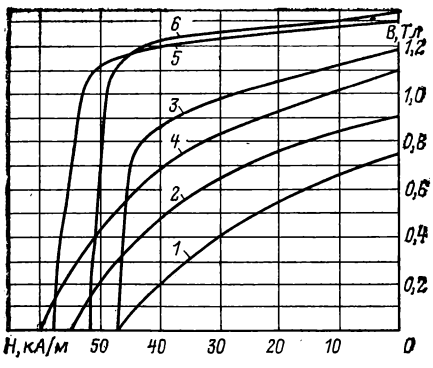


Рис. 16.34. Кривые размагничивания магнитно-твердых сплавов:

1 — ЮНДК15; *2* — ЮНДК18; *3* — ЮНДК24; *4* — ЮНДК24Т2; *5* — ЮНДК25БА; *6* — ЮНДК25А

Таблица 16.29. **Прутки из легированной магнитно-твердой стали (ГОСТ 6862-71)**

Марка	H_c, А/м	B_r, Тл
	не менее	
ЕХ3	4775	0,95
ЕХ6	4775	1,00
ЕХ5К5	7162	0,85
ЕХ9К15М2	11 937	0,80

Таблица 16.30. **Материалы магнитно-твердые литые (ГОСТ 17809-72)**

Марка	$(BH)_{max}$, кДж/м³	H_cB, кА/м	B_r, Тл	Отношение B/H в точке $(BH)_{max}$, 10^{-3} Тл/кА/м
ЮНД4	7,2	40	0,50	12,0—16,0
ЮНД8	10,2	44	0,60	13,0—16,0
ЮНТС	8,0	58	0,43	7,0—10,0
ЮНДК15	12,0	48	0,75	15,5—18,0
ЮНДК18	19,4	55	0,90	15,0—20,0
ЮНДК18С	28	44	1,10	22,0—28,0
ЮН13ДК24С	36	36	1,30	30,0—33,0
ЮН13ДК24	36	40	1,25	25,0—27,5
ЮН14ДК24	35	48	1,20	20,0—22,0
ЮН15ДК24	36	52	1,15	15,0—17,5
ЮН13ДК25А	56	44	1,40	27,5—30,0
ЮН14ДК25А	56	52	1,35	24,0—25,0
ЮН13ДК25БА	56	48	1,40	26,5—27,5
ЮН14ДК25БА	56	58	1,30	21,5—24,0
ЮН15ДК25БА	56	62	1,25	15,5—21,5
ЮНДК34Т5	28	92	0,75	8,0—11,0
ЮНДК35Т5Б	32	16	0,75	8,0—10,0
ЮНДК35Т5	36	110	0,75	7,0—8,0
ЮНДК35Т5БА	72	110	1,02	8,0—9,0
ЮНДК35Т5АА	80	115	1,05	8,0—9,0
ЮНДК38Т7	36	135	0,75	4,5—5,5
ЮНДК40Т8	36	145	0,70	3,5—4,5
ЮНДК40Т8АА	64	145	0,90	4,0—5,0

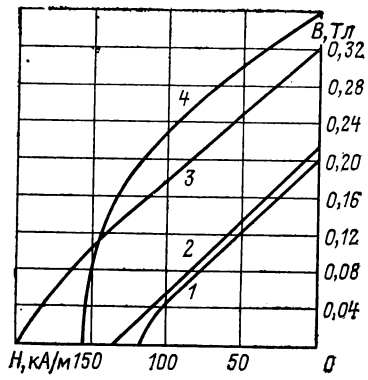


Рис. 16.35. Кривые размагничивания бариевых ферритов:

1 — 0,7БИ; *2* — 1БИ; *3* — 2БА; *4* — 3БА

В табл. 16.31 приведены температурные коэффициенты α_B магнитной индукции в точке максимума магнитной энергии для сплавов типа ЮНДК

$$\alpha_B = \frac{\Delta B}{B\,\Delta T},$$

где ΔB — изменение индукции, вызванное изменением температуры на ΔT, °С; B — магнитная индукция при начальной температуре.

Большой удельный вес выпуска постоянных магнитов падает на производство магнитов из бариевых ферритов, имеющих $H_c = 160 \div 200$ кА/м, $B_r = 0{,}2 \div 0{,}4$ Тл, $(BH)_{max} = 6{,}0 \div 25$ кДж/м³. Кривые размагничивания их приведены на рис. 16.35. Широкое использование бариевых магнитов объясняется недефицитностью и дешевизной исходных материалов. Параметры основных марок изотропных нетекстурованных и анизотропных текстурованных бариевых ферритов приведены в табл. 16.32.

На рис. 16.36 приведены кривые размагничивания, а в табл. 16.33 представлены основные параметры металлокерамических постоянных магнитов, выпускаемых отечественной промышленностью согласно ГОСТ 13596-68 [16.15]. Для металлокерамических материалов марок ММК1—ММК11 α_B составляет 0,035—0,048 %/°С.

Из деформируемых высококоэрцитивных сплавов наиболее высокой H_c (до 430 кА/м) обладают кобальт-платиновые сплавы и кристаллические образцы, вырезанные из монокристаллов ($H_c = 560$ кА/м). Высокая пластичность кобальт-платиновых сплавов позво-

Таблица 16.31. **Температурный коэффициент сплавов типа ЮНДК**

Материал	α_B, %/°С						
	—180÷—80	—80÷20	20÷200	200÷300	300÷400	400÷500	500÷600
ЮНДК24	+0,015	−0,020	—0,015	—0,023	—0,030	—0,037	—0,044
ЮНДК25БА	+0,015	—0,020	—0,015	—0,023	—0,030	—0,037	—0,044
ЮНДК35Т5	+0,025	+0,025	—0,008	—0,015	—0,019	—0,024	—0,028
ЮНДК35Т5БА	+0,025	+0,025	—0,008	—0,015	—0,019	—0,024	—0,028
ЮНДК38Т7	+0,020	+0,020	—0,006	—0,011	—0,017	—0,022	—0,026
ЮНД4	+0,020	+0,020	—0,020	—0,026	—0,033	—	—

Таблица 16.32. Магнитные свойства бариевых ферритов

Марка	B_r, Тл	H_c, кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м³
0,7БИ	0,18—0,21	110—130	6—7
1БИ	0,19—0,22	130—140	7—10
2БИ	0,3—0,35	180—230	16—23
3БИ	0,36—0,4	130—140	24—25

Таблица 16.33. Магниты металлокерамические постоянные (ГОСТ 13596-68)

Марка	B_r, Тл	H_c, кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м³	B_d, Тл	H_d, кА/м
ММК1	0,60	24	6	0,35	17
ММК2	0,48	39	7	0,30	23
ММК3	0,52	48	8	0,30	27
ММК4	0,55	40	9	0,30	30
ММК5	0,60	44	9,4	0,35	27
ММК6	0,65	44	10	0,40	25
ММК7	0,95	44	21	0,60	35
ММК8	1,10	40	28	0,80	35
ММК9	0,75	80	24	0,45	54
ММК10	0,80	100	30	0,53	57
ММК11	0,70	128	32	0,40	80

ляет изготовлять из них детали практически любой конфигурации. Высокая стоимость этих материалов ограничивает применение их в широких областях. В нашей стране изготавливают кобальт-платиновые сплавы ПЛК-76 и ПЛК-78 согласно ЭМТУ 07-77-67 в виде прутков и ЦМТУ 07-82-68 в виде полос (рис. 16.37). Техническими условиями регламентируется состав: 76,5—79,5 % *Pt*, остальное — Со. Максимальной H_c (до 430 кА/м) обладает сплав приблизительно стехиометрического состава при $(BH)_{max}=79\div90$ кДж/м³. Температурный коэффициент α_B кобальт-платиновых сплавов равен 0,015 %/°С.

Для изготовления малогабаритных магнитов и активной части гистерезисных двигателей распространение получили железокобальтванадиевые сплавы с заданным сочетанием параметров предельной петли гистерезиса. Сплавы изготавливают в виде проволоки и лент. Увеличение процентного содержания ванадия приводит к уменьшению B_r, но одновременному увеличению H_c и $(BH)_{max}$ (рис. 16.38).

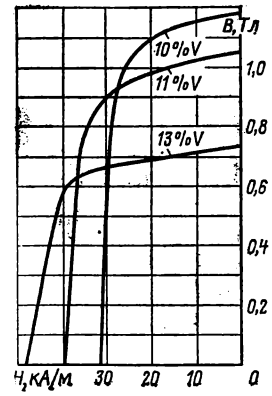


Рис. 16.38. Кривые размагничивания сплава 52КФ в зависимости от процентного содержания ванадия

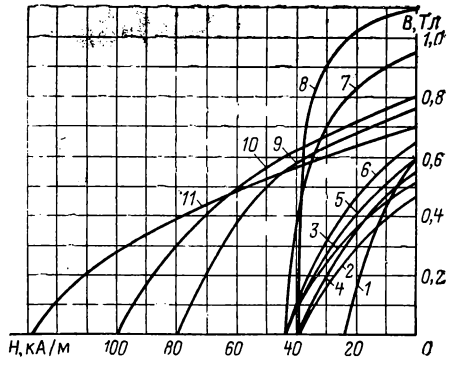


Рис. 16.36. Кривые размагничивания металлокерамических магнитов:
1—11 — ММК1—ММК11

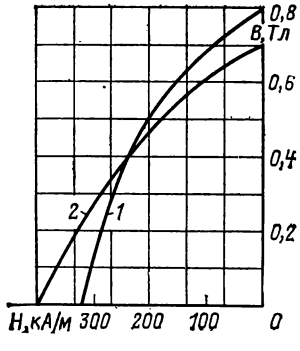


Рис. 16.37. Кривые размагничивания платинокобальтовых сплавов:
1 — ПлК76; *2* — ПлК78

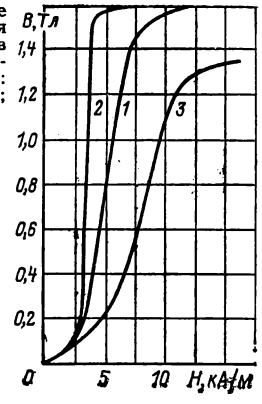


Рис. 16.39. Основные кривые намагничивания магнитных материалов для активной части гистерезисных двигателей:
1 — 35КХ4Ф; *2* — 35КХ8Ф; *3* — 35КФ10Н

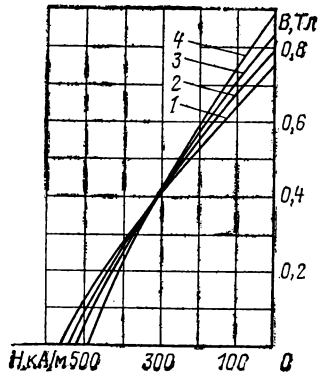


Рис. 16.40. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:
1 — КС37; *2* — КС37А; *3* — КСП37; *4* — КСП37А

Таблица 16.34. **Железокобальтванадиевые магнитно-твердые сплавы (ГОСТ 10994-74)**

Марка	Основные технические характеристики	Назначение
52К10Ф	Сплав с магнитной энергией 16—24 кДж/м³. В зависимости от содержания ванадия H_c =4,8÷32 кА/м; B_r =1,2÷0,65 Тл. Магнитные свойства приобретаются после холодной деформации 70—90 % и последующего отпуска	Малогабаритные магниты, активная часть гистерезисных двигателей
35КХ4Ф, 35КХ6Ф, 35КХ8Ф, 25КФ14Н, 35КФ10Н	Сплавы с заданными параметрами частотной петли гистерезиса. Приобретают свойства после холодной деформации и отпуска. Сплавы 35КХ4Ф, 35КХ6Ф, 35КХ8Ф анизотропны. Сплавы 25КФ14Н, 35КФ10Н имеют прямоугольную петлю гистерезиса	Активная часть гистерезисных двигателей

Примечание. 52К10Ф—Fe—Co—V; 35КХЧФ—35КХ8Ф—Fe—Co—Cr—V; 25КФ14Н, 35КФ10Н—Fe—Co—Ni—V.

Таблица 16.35. **Основные параметры магнитно-твердых спеченных материалов (ГОСТ 21559-76)**

Марка	B_r, Тл	H_{cB}, кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м³	H_{cM}, кА/м
КС37	0,77	540	110	1330
КС37А	0,82	570	130	1000
КСП37	0,85	520	130	800
КСП37А	0,90	500	145	640

Примечание. К — кобальт, С — самарий, П — празеодим, А — улучшенная структура.

Таблица 16.36. **Температурный коэффициент α_B МТМ на основе РЗМ-Со**

Соединение	x	α_B, %/°С в интервале температур, °С			
		—100÷20	20—100	100—200	—100÷200
$Sm_xGd_{1-x}Co_5$	0,47	0,005	0,005	—0,012	0,005
$Sm_xTb_{1-x}Co_5$	0,3	0,005	—0,016	—0,022	—0,014
$Sm_xDy_{1-x}Co_5$	0,3	0,005	—0,014	—0,022	—0,013
$Sm_{1-x}Er_xCo_5$	0,2	0,007	—0,013	—0,024	—0,014
$SmCo_5$	0	—0,03	—1,04	—0,045	—0,036

Низкие гистерезисные свойства и высокая стоимость железокобальтванадиевых сплавов в кованом состоянии делают нецелесообразным их применение в электромашиностроении. Для двигателей с рабочими напряженностями 2—10 кА/м нашли применение сплавы систем Fe—Co—Cr—V и Fe—Co—Ni—V. Технические характеристики прецизионных магнитно-твердых сплавов регламентируются ГОСТ 10994-74 (табл. 16.34) [16.10]. На рис. 16.39 представлены основные кривые намагничивания сплавов 35КХ4Ф, 35КХ8Д, 35КФ10В.

В последние годы успешное развитие получили высококоэрцитивные материалы на основе соединений редкоземельных металлов и кобальта. Получают их по специальной технологии с применением сильных магнитных полей для текстурования и высоких давлений для прессования порошков. Параметры спеченных магнитно-твердых материалов на основе сплавов редкоземельных элементов с кобальтом приведены в табл. 16.35 и соответствуют ГОСТ 21559-76 [16.15].

Кривые размагничивания сплавов КС37, КС37А, КСП37 и КСП37А показаны на рис. 16.40.

В табл. 16.36 приведены значения температурного коэффициента α_B магнитно-твердых материалов на основе сплавов РЗМ—Со.

В настоящее время интенсивные исследования ведутся в области аморфных магнитно-твердых материалов. Быстрое охлаждение расплава системы Fe—Co—V позволяет получить высококоэрцитивное состояние в сплавах типа викалоя без предварительной холодной деформации с высокой степенью обжатия. Коэрцитивная сила сплава с 14 % V достигает 48 кА/м, а у сплава с 20 % V — 68 кА/м. Это пока рекордные значения H_c, полученные на сплавах этого типа без термомеханической обработки. Интерес представляют аморфные магнитно-твердые сплавы на основе систем железо—гадолиний, железо—тербий, кобальт—гадолиний, кобальт—медь—самарий. Эти сплавы в виде тонких пленок имеют очень высокие значения коэрцитивной силы (около 10^4 кА/м) в направлении, перпендикулярном плоскости пленки, и могут применяться как материалы для термомагнитной записи информации. Одним из важных аспектов применения аморфного состояния может явиться искусственное образование аморфной структуры на хрупких магнитно-твердых материалах типа ЮНДК и КС. Поверхностный слой толщиной порядка 1 мкм, имеющий повышенную твердость, прочность, коррозионную стойкость, может защищать основной материал от внешних механических и химических воздействий.

16.8. ЦЕНЫ

В табл. 16.37—16.44 представлены цены на наиболее широко распространенные магнитные материалы.

Таблица 16.37. **Оптовые цены на холоднокатаную анизотропную электротехническую сталь (ГОСТ 21427.1-83)**

Марка	Код марки	Ширина рулона, мм	Толщина, мм	Цена за 1 т, руб.
3311	9180	750—1000	0,35—0,50	372—579
3412	9181	750—1000	0,35—0,50	451—658
3413	9182	750—1000	0,30—0,50	513—799
3404	9186	750—1000	0,28—0,50	—
3405	9187	750—1000	0,28—0,35	859—927
3406	9188	750—1000	0,28	930—958

Таблица 16.38. **Оптовые цены на холоднокатаную изотропную электротехническую сталь (ГОСТ 21427-83)**

Марка	Код марки	Ширина рулона, мм	Толщина, мм	Цена за 1 т, руб.
2011	9157	500—1000	0,50—0,65	216—264
2012	9158	500—1000	0,50—0,65	241—305
2013	9159	500—1000	0,50—0,65	264—334
2111	9148	500—1000	0,50—0,65	194—267
2112	9165	500—1000	0,50—0,65	243—321
2211	9151	500—1000	0,50—0,65	267—323
2212	9153	500—1000	0,50—0,65	292—342
2311	9164	500—1000	0,50—0,65	332—400
2312	9154	500—1000	0,50—0,65	351—441
2411	9152	500—1000	0,50—0,65	435—540
2412	9162	500—1000	0,50—0,65	482—592

Таблица 16.39. **Оптовые цены на горячекатаную электротехническую сталь (ГОСТ 21427-78)**

Марка	Код марки	Размеры листов, мм	Толщина листов, мм	Цена за 1 т, руб.
1211	9120	500×500—1000×2000	0,50—1,00	211—270
1212	9121	500×500—1000×1000	0,50—1,00	206—276
1213	9122	500×500—1000×1000	0,50—1,00	220—300
1311	9123	500×500—1000×1000	0,50	290—312
1312	9124	500×500—1000×1000	0,50	316—339
1313	9156	500×500—1000×1000	0,50	338—363
1411	9125	500×500—1000×1000	0,35—0,50	325—396
1412	9126	500×500—1000×1000	0,35—0,50	335—409
1413	9128	500×500—1000×1000	0,35—0,50	348—417
1511	9129	500×500—1000×1000	0,35—0,50	347—416
1512	9130	500×500—1000×1000	0,35—0,50	358—422
1513	9131	500×500—1000×1000	0,35—0,50	363—431
1514	9132	500×500—1000×1000	0,35—0,50	369—442
1521	9133	500×500—1000×1000	0,10—0,35	431—898
1561	9134	500×500—1000×1000	0,20—0,35	419—685
1562	9135	500×500—1000×1000	0,20—0,35	431—707
1571	9136	500×500—1000×1000	0,20—0,35	419—685
1572	9137	500×500—1000×1000	0,20—0,35	431—707

Таблица 16.40. **Оптовые цены на холоднокатаную ленточную электротехническую сталь (ГОСТ 21427-78)**

Марка	Ширина ленты, мм	Толщина ленты, мм	Цена за 1 т, руб.
3421	5—240	0,05—0,20	1460—5810
3422	5—240	0,05—0,15	2140—6380
3323	5—240	0,05—0,15	2430—7260
3424	5—240	0,05—0,15	2730—8130
3425	5—240	0,05—0,15	3020—9000

Таблица 16.41. **Оптовые цены на горячекатаную нелегированную электротехническую сталь (ГОСТ 3836-83)**

Марка	Код марки	Толщина листов, мм	Цена за 1 т, руб.
10895	9103	0,4—3,9	135—241
10880	9105	0,4—3,9	154—275
10864	9107	0,4—3,9	172—307
10848	9101	0,4—3,9	189—308

Таблица 16.42. **Оптовые цены на холоднокатаную нелегированную электротехническую сталь (ГОСТ 3863-83)**

Марка	Код марки	Толщина листов, мм	Цена за 1 т, руб.
20895	9103	0,35—3,9	152—288
20880	9105	0,35—3,9	173—324
20864	9107	0,35—3,9	192—358
20848	9101	0,35—3,9	213—392

Таблица 16.43. **Оптовые цены на прецизионные сплавы (ГОСТ 10160-75)**

Марка	Толщина ленты, мм	Цена за 1 кг, руб.
45Н	0,10—0,35	6,39—9,86
50Н, 50НП	0,005—0,35	6,70—45,0
50НХС	0,005—0,35	7,21—47,0
80НХС	0,005—0,35	10,29—58,0
64М	0,01—0,10	11,6—29,1
65 НП	0,02—0,35	7,69—22,51
68НПМ	0,02—0,20	10,64—22,51
79НМ	0,0015—0,003	11,56—68,0
79НПМ	0,0015—0,003	135—205
34НКМП	0,005—0,35	23,19—200
35НКХСП	0,005—0,35	22,03—96
47НК	0,01—0,010	28,82—52,25
27КХ	0,35	88,56
40НКМ-ВД	0,01—0,10	42,75—70,98
49К2Ф	0,20	131,54
49К2ФА-ВД	0,05—0,35	177,42—265,42

Таблица 16.44. **Оптовые цены на магнитно-твердые сплавы**

Марка	Цена за 1 т, руб.	Марка	Цена за 1 т, руб.
ЮНДК24	6600	52КФ11	15 660
ЮНДК25	25 000	ПлК-76, ПлК-78	$5 \cdot 10^3$
ЮНДК35Т5БА	19 100	КС37	$1{,}5 \cdot 10^3$
ЮНДК35БА	46 000		

Список литературы

16.1. **Рейнбот Г.** Магнитные материалы и их применение. Л.: Энергия, 1970. 384 с.

16.2. **Хек К.** Магнитные материалы и их техническое применение. М.: Энергия, 1973. 304 с.

16.3. **ГОСТ 3836-83.** Сталь электротехническая нелегированная тонколистовая и ленты.

16.4. **Дружинин В. В.** Магнитные свойства электротехнической стали. М.: Энергия, 1974. 240 с.

16.5. **ГОСТ 21427.0-75, ГОСТ 21427.1-83, ГОСТ 21427.2-83, ГОСТ 21427.3-75.** Сталь электротехническая тонколистовая.

16.6. **ГОСТ 11036-75.** Сталь сортовая электротехническая нелегированная.

16.7. **ГОСТ 21427.4.78.** Лента стальная электротехническая холоднокатаная анизотропная.

16.8. **ГОСТ 10160-75.** Сплавы прецизионные магнитно-мягкие.

16.9. **Ферриты и магнитодиэлектрики.** Справочник/Под ред. Н. Д. Горбунова, Г. А. Матвеева. М.: Советское радио, 1968. 176 с.

16.10. **ГОСТ 10994-74.** Сплавы прецизионные.

16.11. **Прецизионные** сплавы. Справочник/Под ред. В. В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983. 440 с.

16.12. **ГОСТ 6862-71.** Прутки из легированной магнитотвердой стали.

16.13. **ГОСТ 17809-72.** Материалы магнитотвердые литые.

16.14. **ГОСТ 13596-68.** Магниты металлокерамические постоянные.

16.15. **ГОСТ 21559-76.** Материалы магнитотвердые спеченные.

Раздел 17

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

СОДЕРЖАНИЕ

17.1. Общие сведения 464
17.2. Приборы неразрушающего контроля . 464
Дефектоскопы (464). Толщиномеры (469). Приборы для контроля физико-механических свойств (471). Приборы для контроля электрофизических параметров (472).
17.3. Неразрушающий контроль качества проводниковых и полупроводниковых материалов и изделий из них 473
Контроль проводниковых и полупроводниковых материалов по удельной электрической проводимости (473). Дефектоскопия и контроль размеров проводников (474).
17.4. Неразрушающий контроль качества изоляционных материалов и изделий из них 474
17.5. Неразрушающий контроль сварных соединений 475
17.6. Неразрушающий контроль качества в производстве и эксплуатации . . . 475
Контроль качества в электромашино-, электроаппаратостроении и кабельной промышленности (475). Контроль качества в электронной промышленности и электроприборостроении (478).
Список литературы 480
Предметный указатель 481

17.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Контроль качества электротехнических материалов и изделий, называемых в дальнейшем объектами контроля (ОК), — это определение свойств, характеризующих пригодность ОК к использованию в соответствии с назначением. Контроль качества осуществляют непосредственным или косвенным определением параметров и характеристик ОК, а также определением тех свойств ОК и их составных частей, от которых зависят выходные характеристики и параметры ОК, их надежность и долговечность. К таким свойствам относятся, например, наличие или отсутствие нарушений сплошности материалов и деталей, физико-механические свойства (прочность, твердость, упругость, износостойкость и т. д.), надежность электрических и механических соединений, правильность сборки и электрического монтажа, правильность термообработки, толщина и свойства изоляционных, антикоррозионных и других покрытий. Для определения этих свойств используют методы разрушающего и неразрушающего контроля.

Разрушающий контроль (РК) применяется для выборочных испытаний отдельных образцов ОК, и по его результатам статистическими методами делается заключение о качестве партии ОК, к которой относятся испытуемые образцы. РК позволяет непосредственно определить контролируемые параметры или характеристики (например, предел прочности или толщину покрытия), но не дает полной уверенности в удовлетворительном качестве всей партии ОК. Кроме того, РК трудоемок и почти не поддается автоматизации.

Неразрушающий контроль (НК) не приводит к разрушению или повреждению ОК, поэтому им может быть охвачено 100 % всех ОК в процессе их изготовления или эксплуатации. В отличие от РК, НК обычно не дает прямой связи с контролируемыми параметрами, и для высокой достоверности результатов НК, как правило, требуется их выборочная проверка методами РК, выполняемая на стадии первоначального введения НК, а также как средство арбитражного контроля в сомнительных случаях. НК базируется на различных физических принципах и использует методы и средства, как правило, хорошо поддающиеся автоматизации, что позволяет создавать полностью автоматизированные комплексы контроля качества, резко повышающие производительность труда и дающие высокий экономический эффект.

Различают три основных направления использования НК: дефектоскопия, структуроскопия и толщинометрия. Дефектоскопия связана с обнаружением нарушений сплошности ОК; структуроскопия — с определением физико-механических, электрофизических и других свойств ОК; толщинометрия — с измерением геометрических параметров ОК. Методы НК группируются в девять видов НК по общности физических характеристик в соответствии с ГОСТ 1853-79 [17]: акустический, вихретоковый, магнитный, оптический, проникающих веществ, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический.

17.2. ПРИБОРЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Дефектоскопы

Это наиболее распространенный вид приборов НК.

Принцип действия *акустических дефектоскопов* основан на регистрации параметров упругих колебаний, возбужденных в ОК. Шире других применяются ультразвуковые эхо-дефектоскопы (табл. 17.1). Структурная схема импульсного ультразвукового эхо-дефектоскопа приведена на рис. 17.1 [17.2]. Пьезоэлектрический искатель *1* служит для преобразования импульсов переменного напряжения в упругие ультразвуковые колебания, излучения их в ОК, приема отраженного от дефектов уль-

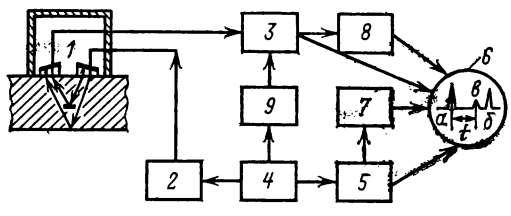


Рис. 17.1. Структурная схема импульсного ультразвукового эхо-дефектоскопа

Таблица 17.1. Технические данные ультразвуковых дефектоскопов, выпускаемых кишиневским заводом «Электроточприбор»

Тип дефектоскопа	Рабочая частота, МГц	Глубина прозвучивания в стали, м	Мертвая зона в стали, мм	Габариты, мм	Масса, кг	Цена, руб.
ДУК-66ПМ	0,6; 1,25; 2,5; 5,0; 10,0	2,5	0,5	260×170×435	9,5	950
УД-10П	0,6; 1,25; 2,5; 5,0; 10,0; 25,0	5	0,5	345×195×470	12	2000
УД-11УА	1,25; 2,5; 5,0; 10,0	5	—	490×215×510	25	2500
УД-11ПУ	1,25; 2,5; 5,0; 10,0	5	—	170×280×350	7,5	1500
УД-13УР («Рельс-6»)	2,5	0,15	3	255×175×420	8	1000

тразвука и преобразования его в электрические сигналы. Генератор *2* зондирующих импульсов вырабатывает радиоимпульсы напряжения для возбуждения излучателя искателя. Усилитель *3* состоит из усилителя высокой частоты и детектора. Синхронизатор *4* служит для обеспечения синхронной работы основных блоков дефектоскопа. Он одновременно запускает генератор *2* и генератор развертки *5*, который вырабатывает линейно изменяющееся напряжение развертки электронно-лучевой трубки *6*. На ее экране формируется изображение в виде трех импульсов: зондирующего *а*; донного *б*, соответствующего отражению ультразвука от «дна» ОК; импульса дефекта *в*, расположенного между первыми двумя. Измеритель *7* времени предназначен для измерения времени t распространения ультразвука до дефекта и обратно. Селектор *8* позволяет анализировать эхо-сигнал от дефекта по времени и по амплитуде. Блок *9* временно́й регулировки чувствительности служит для выравнивания амплитуд сигналов от дефектов, залегающих на разной глубине. Ультразвуковые дефектоскопы (УЗД) предназначены в основном для контроля объектов из металлов и сплавов, а также сварных соединений в них. Возможен также контроль пластиков, резины, стекла, фарфора, керамики, т. е. материалов с относительно высоким коэффициентом затухания ультразвука α (Нп/м), определяемым как расстояние, на котором амплитуда плоской акустической волны убывает в e раз. Важный параметр УЗД — максимальная глубина прозвучивания обратно пропорциональна α и убывает с ростом частоты акустических колебаний. Второй важный параметр — мертвая зона (или минимальная глубина прозвучивания) определяется минимальной глубиной залегания искусственного дефекта в виде цилиндра диаметром 2 мм, надежно выявляемого дефектоскопом. Третий параметр — чувствительность определяется обычно порогом чувствительности или предельной чувствительностью—минимальными размерами искусственного отражателя ультразвука, который может быть обнаружен дефектоскопом. Мерой порога чувствительности служит площадь отверстия с плоским дном, ориентированным перпендикулярно акустической оси искателя. Порог чувствительности зависит от режима работы УЗД, материала и формы ОК, состояния его поверхности и обычно составляет несколько квадратных миллиметров. Поскольку максимальная глубина прозвучивания материалов с большим α у УЗД мала, то объекты из таких материалов контролируют акустическими дефектоскопами (АД), работающими в звуковом диапазоне частот (табл. 17.2). АД в отличие от УЗД не требуют акустического контакта с ОК через слой смазывающей жидкости (глицерин, масло, спирт), используя «сухой контакт». Дефектоскоп АД-10Б использует электромагнитно-акустический принцип, вообще не требующий акустического контакта с ОК, но применим только для контроля объектов, содержащих металлические слои.

Вихретоковые дефектоскопы (ВД) основаны на регистрации электромагнитного поля вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой вихретокового преобразователя (ВТП) в электропроводящем ОК (табл. 17.3). Ток генератора высокой частоты возбуждает переменное магнитное поле обмоток ВТП, подключенных к нему. При взаимодействии поля с ОК в последнем возникают вихревые токи, плотность которых зависит от электрофизических и геометрических параметров ОК (в том числе от наличия и размеров дефектов). Магнитное поле вихревых токов, действуя на обмотки ВТП, меняет их полное комплексное сопротивление (в параметрическом варианте) или ЭДС (в трансформаторном варианте). Дефектоскопы с проходными ВТП в виде одной или нескольких катушек, охватывающих ОК, применяют для высокопроизводительного контроля проволоки, шин, прутков, труб, а также шариков и роликов подшипников качения, винтов и других ОК. Дефектоскопы с накладными ВТП в виде катушек, подносимых торцом к поверхности ОК, применяют для контроля плоских ОК (листы, ленты, пластины и т. п.), а также для контроля ОК более сложной формы. Используя устройства вращения накладных ВТП вокруг ОК или внутри него (сканирование поверхности ОК), контролируют наружные и внутренние поверхности труб, стенки отверстий и т. д. Учитывая малую глубину проникновения электромагнитного поля в металлы, ВД используют для обнаружения поверхностных и подповерхностных (на глубине нескольких мм) дефектов. Основной параметр ВД — порог чувствительности, определяемый минимальными размерами дефекта заданной формы и положения, при которых отношение сигнал/помеха равно 2. Для ВД с проходными ВТП порог чувствительности определяется обычно глубиной узкого длинного продольного дефекта, выраженной в процентах поперечного размера (диаметра) ОК, а для ВД с накладными ВТП — абсолютными размерами дефекта [17.2, 17.3]. ВД не требуют механического контакта ВТП с ОК, что позволяет реализовать высокопроизводительный бесконтактный контроль.

Принцип действия *магнитных дефектоскопов* (МД) основан на регистрации магнитных полей рассеяния дефектов при намагничива-

Таблица 17.2. **Технические данные акустических дефектоскопов**

Тип дефектоскопа	Рабочая частота, кГц	Объекты контроля	Порог чувствительности	Габариты, мм	Масса, кг	Изготовитель	Цена, руб.
АД-10Б	40	Многослойные конструкции с металлической обшивкой	Диаметр дефекта 8 мм на глубине 0,5 мм; диаметр дефекта 25 мм на глубине 2,5 мм	Электронного блока: 210×135×330 преобразователя: ⌀ 60×108	7,8	Запорожский опытный завод дефектоскопии	1000
АД-40И	1,5—10	Многослойные металлические конструкции, слоистые пластики	Диаметр дефекта 8 мм	155×264×465	10	Кишиневский завод «Электроточприбор»	950
АД-50У	1—20	То же	Площадь дефекта 2 см² на глубине 0,5 мм и 15 см² на глубине 30 мм	345×320×225	10,5	Запорожский опытный завод дефектоскопии	2000
АД-60С	0,5—20	» »	Площадь дефекта 1 см² на глубине от 0,5 до 30 мм	300×210×290	10	То же	1800

Таблица 17.3. **Технические данные вихретоковых дефектоскопов**

Тип дефектоскопа	Вид ВТП	Объекты контроля	Порог чувствительности	Скорость контроля, м/с	Допустимый зазор между ВТП и объектом контроля, мм	Габариты, мм	Масса, кг	Изготовитель	Цена, руб.
ВД-23П	Проходной	Проволока ферро- и неферромагнитная ⌀ 0,02—5 мм	Продольная трещина глубиной 2—15% диаметра (в зависимости от диаметра проволоки)	0,3—5	—	Электронного блока: 525×547×275; блока преобразователя: 330×210×200	55 (общая)	Московский опытный завод «Контрольприбор»	3000
ВД-31П	То же	Ферро- и неферромагнитные прутки и трубы ⌀ 1—47 мм	Продольная трещина глубиной 1—2% диаметра (в зависимости от диаметра ОК)	0,5—4	—	Электронного блока: 525×547×265; блока преобразователей: 548×330×310	155 (общая)	То же	3500
ВД-40Н (ВД-41Н)	Накладной	То же ⌀ 30—120 мм (⌀ 10—50 мм)	Трещина глубиной 0,2—0,5 мм	—	3	Приборной стойки: 1570×530×580; устройства механического сканирования: 680×568×830 (690×460×650)	300 (общая)	» »	7000 (6600)
ВД-22Н («Проба-5)»	То же	Листы, трубы, ребра шириной 2,5 мм, отверстия ⌀ 4—25 мм, объекты сложной формы из ферро- и неферромагнитных металлов и сплавов	То же	—	0,1	200×105×125	1,5	Кишиневский завод «Электроточприбор»	1160
ВД-80Н	» »	То же (за исключением отверстий), галтельные переходы и края изделий	Трещины глубиной 0,3 мм	—	0,1	90×150×250	2	Московский завод «Контрольприбор»	600 (условно)
ВПД-МУ	» »	Детали разной формы из ферро- и неферромагнитных металлов и сплавов (алюминиевых, магниевых, титановых)	То же	—	0	210×140×70	0,9	Кишиневский завод «Электроточприбор»	85

Таблица 17.4. **Технические данные магнитных дефектоскопов**

Тип дефектоскопа	Область применения	Габариты, мм	Масса, кг	Изготовитель	Цена, руб.
ПМД-70 (магнитопорошковый)	Контроль ферромагнитных деталей, сварных швов, стенок отверстий в полевых, лабораторных и цеховых условиях	660×500×260	48+30 (принадлежности)	Кишиневский завод «Электроточприбор»	950
МД-50 (магнитопорошковый)	Контроль крупногабаритных ферромагнитных деталей по частям, а также деталей без демонтажа узлов в цеховых и лабораторных условиях	1000×600×750	250 (без платформы)	То же	3400
МД-11Г (магнитографический)	Контроль сварных соединений в магистральных трубопроводах и других крупногабаритных объектах	295×426×555	25	Калининградский экспериментальный завод ВНПО «Союзгазавтоматика»	1240

нии ферромагнитных ОК. Для регистрации полей рассеяния применяют магнитный порошок, магнитную ленту, феррозонды, преобразователи Холла, индукционные, магниторезистивные и магнитодиодные преобразователи (см. § 6.6). *Магнитопорошковые дефектоскопы* просты в устройстве и эксплуатации и могут применяться для контроля разнообразных ферромагнитных объектов любой формы (табл. 17.4). ОК намагничивают пропусканием через него импульса тока или помещением ОК в магнитное поле катушки (или витка) с током. Для обнаружения дефектов поверхность ОК покрывают водной или масляной суспензией, содержащей магнитный порошок, который осаждается вблизи дефектов, образуя контрольный рисунок. Часто в суспензию добавляют люминофоры, которые дают повышение контраста рисунка при облучении источником ультрафиолетового излучения. Магнитопорошковые дефектоскопы позволяют обнаруживать поверхностные дефекты глубиной от 0,01 мм при ширине от 0,001 мм, а также подповерхностные дефекты. Порог чувствительности дефектоскопов зависит от состояния поверхности и однородности ОК. Этот вид дефектоскопов имеет наименьший порог чувствительности из всех видов дефектоскопов, но применим только к контролю ферромагнитных объектов и плохо поддается автоматизации.

Магнитографические дефектоскопы основаны на регистрации магнитных полей рассеяния дефектов на магнитной ленте, наложенной на намагниченный ОК, с последующим считыванием информации с магнитной ленты магнитными головками и воспроизведением сигналов на осциллографическом индикаторе.

Дефектоскопы, использующие проникающие вещества, делятся на капиллярные и течеискатели. *Капиллярная дефектоскопия* основана на выявлении невидимых или слабо видимых глазом поверхностных дефектов с помощью проникающих жидкостей (пенетрантов). *Дефектоскопия течеисканием* основана на обнаружении утечек жидкости или газа через сквозные дефекты. При использовании люминесцирующих пенетрантов индикаторный рисунок, полученный после удаления излишков пенетранта с поверхности ОК и образованный пенетрантом, адсорбированным специальными проявителями из поверхностных дефектов, рассматривают в ультрафиолетовых лучах. Оборудование для капиллярной дефектоскопии простое и состоит из комплекта дефектоскопических материалов, ультрафиолетового облучателя и некоторых вспомогательных устройств. Бобруйским весовым заводом выпускается аэрозольный комплект типа КД-40ЛЦ с ультрафиолетовым облучателем и стендом для зарядки аэрозольных баллонов (цена 6500 руб.). Капиллярная дефектоскопия позволяет обнаруживать весьма малые поверхностные дефекты в металлических (ферро- и неферромагнитных) и неметаллических (керамика, фарфор, пластики) объектах.

В радиационных дефектоскопах используют в качестве источников излучения рентгеновские трубки, радиоактивные изотопы и ускорители заряженных частиц. Для рентгеновской дефектоскопии применяют установки, состоящие из рентгеновской трубки, высоковольтного источника напряжения и контрольной аппаратуры (табл. 17.5). При *радиографическом способе* регистрации результатов контроля используют фоточувствительную пленку (пленочная радиография) или обычную бумагу, на которой получают изображение с помощью полупроводниковых пластин (электрорадиография). *В рентгенотелевизионных аппаратах (интроскопах)* рентгеновское изображение преобразуется в видимое на экране телевизора с помощью специальных передающих электронно-лучевых приборов (табл. 17.6). Радиографический способ дает большую чувствительность и глубину контроля, а рентгенотелевизионный позволяет повысить оперативность контроля. Рентгенотелевизионные установки позволяют получить увеличенное в десятки раз изображение внутренней структуры ОК и поэтому широко используются для контроля элементов радиоэлектронной аппаратуры (полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы и т. д.).

Дефектоскопы с радиоактивными источниками используют гамма-излучение и применяются в основном в качестве переносных и передвижных аппаратов при контроле труднодоступных мест ОК и в полевых условиях. В шланговых гамма-дефектоскопах источник излучения может выдвигаться из контейнера по шлангу-ампулопроводу на расстояние более 12 м. Дефектоскопы с радиоактивными источниками позволяют контролировать стальные ОК толщиной от 1 до 200 мм [17.2]. Для дефектоскопии ОК большей толщины применяют ускорители заряженных частиц (бетатроны, линейные ускорители, микротроны), дающие энергию излучения до нескольких десятков ме-

Таблица 17.5. Технические данные рентгеновских аппаратов

Тип аппарата	Размер фокусного пятна, мм	Назначение	Максимальная толщина просвечивания по стали, мм	Габариты, мм	Масса, кг	Изготовитель	Цена, руб.
РУП-100-10 (передвижной)	1×1	Контроль изделий из легких сплавов, пластмасс и стали, в том числе труднодоступных участков	10	1240×1055×1100	200	Завод «Актюбрентген»	2700
РУП-120-5-1 (портативный)	2×2	Контроль изделий из стали и цветных металлов и сплавов, пластмасс	25	1400×700×1300	75	То же	890
РУП-400-5-1 (передвижной)	7	Контроль в лаборатории, оборудованной биологической защитой	120	1570×2000×950	600	» »	2550
ЭРГА-П2 (электрорентгенографический)	В зависимости от типа рентгеновской трубки	Для контроля сварных и паяных соединений, литья или пластической деформации	60	473×412×214	35	Майский завод «Севкаврентген»	5700
МИРА-2Д (импульсный)	2—3	Для контроля деталей, узлов и конструкций в труднодоступных местах	20	Пульта: 300×250×120; рентгеновского блока: 460×120×230	15	Опытный завод «Буревестник» СКБРА, Ленинград	1950
МИРА-5Д (импульсный)	4	Для контроля металлических деталей и конструкций	60	Пульта: 390×245×155; рентгеновского блока: 765×400×375	50	То же	1000

Таблица 17.6. Технические данные радиационных интроскопов

Тип прибора	Источник излучения	Разрешающая способность линий/мм	Объекты контроля	Телевизионное увеличение, раз	Габариты, мм	Масса кг	Изготовитель	Цена, руб.
МТР-3И	Рентгеновский аппарат РУП-150-10-1	20	Элементы радиоэлектронной аппаратуры, тонкостенные и малогабаритные сварные детали из алюминиевых и магниевых сплавов толщиной 1—50 мм	1,5—30	Рентгеновского блока; 1700×1000×2000; телевизионного блока; 750×500×1200	950 1000	—	—
ПТУ-38	То же	8	Тонкостенные сварные швы, паяные соединения	25	Рентгеновского блока: то же; телевизионного блока: 200×120×105	950	—	—
РИ-60ТК	Рентгеновский аппарат РАП-150/300-0,1	20	Литые детали, толстостенные сварные конструкции из алюминия, титановых сплавов, пластмасс и керамики	—	Рентгеновского блока: 774×1035×340	1200	Московский опытный завод «Контрольприбор»	22 000

гаэлектрон-вольт. Наибольшее распространение получили бетатроны — циклические ускорители электронов. Они используются для дефектоскопии массивных стальных ОК толщиной до 500 мм [17.2]. Следует иметь в виду, что применение любых радиационных дефектоскопов связано с повышенными требованиями к технике безопасности и часто требует специального оборудования помещений.

Радиоволновые дефектоскопы используют электромагнитные волны длиной от 1 до 1000 мм для контроля диэлектрических объектов (резина, пластмассы, теплоизоляционные материалы, бумага) [17.2]. Для экспресс-контроля гомогенности резиновых и других диэлектрических смесей московским опытным заводом «Контрольприбор» выпускается радиоволновой дефектоскоп СН-30АФ, работающий на частоте 10 ГГц (длина волны 30 мм). Он позволяет обнаруживать неоднородности площадью 1 см^2 и более в материалах с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 2 \div 16$

при толщине ОК от 2 до 30 мм. Габариты прибора: электронного блока 300×125×230 мм, преобразователя 130×80×196 мм; общая масса 6 кг; цена 5000 руб.

Приборы *теплового контроля* находят широкое применение в электротехнике и радиоэлектронике для определения тепловых режимов оборудования, приборов и их элементов. К ним относятся термометры разных типов, термоиндикаторы и приборы бесконтактного измерения температуры и исследования температурных полей [17.2]. *Термоиндикаторы*, действие которых основано на изменении состояния, яркости или цвета свечения некоторых веществ при изменении температуры, используют для определения температурного режима радиоэлектронной аппаратуры и электротехнического оборудования в процессе испытаний. Они выпускаются в виде термокарандашей, термолаков, термопорошков и наносятся на ОК. Точность определения температур составляет единицы градусов Цельсия. Термоиндикаторы позволяют запоминать распределение максимальных температур в процессе испытаний, они экономичны и удобны в эксплуатации.

К бесконтактным измерителям температур относятся *пирометры*, измеряющие температуру в точке, и термовизоры для анализа температурных полей [17.2]. Пирометры позволяют измерять температуру в пределах от 0 до 3500 °С с погрешностью в 1—2 % верхнего предела измерения с расстояния в несколько метров. *Термовизоры* представляют тепловое поле («тепловой портрет») ОК на телевизионном экране благодаря преобразованию инфракрасного излучения объекта в электрические сигналы и сканированию его поверхности специальной оптической системой. Разрешающая способность по температуре составляет 0,1—0,4 °С, диапазон измеряемых температур — 30—700 °С. Московский опытный завод «Контрольприбор» выпускает единичными экземплярами тепловизор ИК-10П с диапазоном температур 18—200 °С, разрешением 0,3 °С, полем зрения 5×5°, габаритами 300×500 мм (камера) и 580×500×600 мм (телевизионный монитор), общей массой 50 кг, стоимостью около 13 тыс. руб. В нашей стране хорошо известны тепловизоры шведской фирмы «АГА» (AGA) с несколько лучшими техническими характеристиками и бо́льшими функциональными возможностями [17.2]. Для контроля изделий электронной техники выпускаются тепловизоры «Рубин» и «Янтарь», а также инфракрасный микроскоп, дающие 10—40-кратное увеличение, имеющие геометрическую разрешающую способность от 15 до 150 мкм и тепловую 0,2—0,5 °С при габаритах камеры 60×40×40 мм, индикатора 50×30×30 мм и массе около 20 кг [17.2, 17.4].

Электрические дефектоскопы основаны на регистрации электростатических полей или электрических параметров ОК. Московским заводом «Контрольприбор» выпускается *электрический измеритель глубины трещин* в стальных ОК типа ИГТ-10НК, позволяющий обнаружить трещины глубиной от 0,5 до 50 мм по изменению электрического сопротивления участка ОК. Габариты прибора 90×150×180 мм, масса 2,8 кг, стоимость 470 руб. Для применения прибора необходим электрический контакт с поверхностью ОК. *Электроискровые дефектоскопы* ДИ-74, ДЭП-1 и ДЭП-2 выпускает кишиневский завод «Электроточприбор». Они предназначены для контроля сплошности изоляционных покрытий на электропроводящих ОК: первый — для контроля изоляции трубопроводов при ее толщине до 10 м, а последние — для контроля эмалевых и пленочных покрытий при их толщине до 1 мм (ДЭП-1) или до 2 мм (ДЭП-2). Сквозные дефекты покрытий обнаруживаются электроискровым пробоем между металлическим основанием и щупом дефектоскопа. Габариты дефектоскопа ДИ-74: 375×165×305 мм и щупа с кабелем 1450×87×66 мм, а общая масса 10,5 кг; цена 160 руб. Габариты дефектоскопов ДЭП-1 и ДЭП-2: 460×90×110 мм (блок индикации) и 180×80×120 мм (блок питания), масса 3,5 и 3 кг соответственно; цена 600 руб.

Толщиномеры

Акустические толщиномеры (табл. 17.7) позволяют измерять толщину металлических и неметаллических (стекло, пластмасса, керамика) ОК при одностороннем доступе к ним. Наибольшее распространение получили эхо-импульсные ультразвуковые толщиномеры, принцип действия которых основан на измерении времени между излученным и отраженным от «дна» ОК импульсами ультразвука (см. рис. 17.1). Выпускаются также автоматизированные толщиномеры, предназначенные для контроля толщин стенок труб в производственном потоке, например УТ-3ПА («Металл-6М») [17.2]. Для всех типов ультразвуковых толщиномеров необходим акустический контакт пьезопреобразователя с ОК, осуществляемый через слой смазки или с помощью жидкостной ванны (иммерсионный вариант).

Вихретоковые толщиномеры (табл. 17.8) предназначены для измерения толщины любых диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях, а также для измерения толщины электропроводящих лент, листов, стенок труб, электропроводящих покрытий на диэлектрических основаниях.

Магнитные толщиномеры применяют главным образом для измерения толщины неферромагнитных покрытий (проводящих и непроводящих) на ферромагнитных основаниях (табл. 17.9). Преобладают толщиномеры двух типов: магнитоотрывные, которые измеряют силу взаимодействия постоянного магнита с ферромагнитным основанием, зависящую от толщины покрытия, и индукционные, измеряющие ЭДС индукции в катушке, зависящую от магнитного сопротивления магнитной цепи, связанного с толщиной неферромагнитного покрытия.

Оптические толщиномеры применяют для автоматического измерения диаметра проволоки, труб, толщины и ширины лент, полос и т. п. в производственном потоке. В них используется модуляция светового потока при изменениях геометрических параметров ОК. Световой поток или его вариации измеряются фотоприемником. Погрешность измерения обычно не превышает 0,5—1 %, возможен контроль нагретых до 1200 °С объектов [17.2].

Для измерения диаметра проволоки используют *электрические емкостные приборы*, например измеритель диаметра проволоки

Таблица 17.7. Технические данные ультразвуковых толщиномеров

Тип прибора	Диапазон измеряемых толщин T, мм (по стали и алюминию)	Погрешность измерения	Габариты, мм	Масса, мм	Изготовитель	Цена, руб.
УТ-91П («Кварц-15»)	1,2—200	±0,2 мм при $T=1{,}2\div10$ мм; $\pm(0{,}01T+0{,}1)$ мм при $T=10\div200$ мм	62×172×170	2	Кишиневский завод «Электроточприбор»	900
УТ-92П	0,8—1000	±0,1 мм при $T=0{,}8\div10$ мм; 1 % при $T=10\div1000$ мм	60×170×155	1,5	То же	—
УТ-31МЦ	0,25—300	5 % при $T=0{,}25\div1$ мм; 2,5 % при $T=1\div300$ мм	110×35×210	1	Запорожский опытный завод дефектоскопии	325
УТ-55БЭ	1,5—1000	4 % при $T=1{,}5\div5$ мм; 3 % при $T=5\div10$ мм; 2 % при $T=10\div1000$ мм	180×78×37	0,7	То же	7000

Таблица 17.8. Технические данные вихретоковых толщиномеров

Тип прибора	Объект контроля	Диапазон измерения толщины T, мм	Погрешность, %	Габариты, мм	Масса, кг	Изготовитель	Цена, руб.
ВТ-10 НЦ	Диэлектрические покрытия на неферромагнитных электропроводящих основаниях	0,02—50	5	127×200×280	3,5	Московский опытный завод «Контрольприбор»	400
ВТЛ-10 Н* (на базе микропроцессора)	Листы, ленты из электропроводящих материалов с удельной электрической проводимостью $\gamma=1\div60$ МСм/м	0,005—60	5	—	—	То же	—
ИТМ-10	Медная металлизация отверстий диаметром 1; 1,2; 1,5 мм в печатных платах толщиной 1; 1,5; 2 мм	0,005—0,05	10 от верхнего предела измерения	Прибора: 275×205×150; датчика: ⌀12, длина 155	Прибора 4,5; датчика 0,1	ЭССР	400 (условно)
ИТМ-21* (на базе микропроцессора)	То же для отверстий диаметром 0,8—1,5 мм в платах толщиной 0,8—2 мм	0,005—0,05	То же	Прибора: 295×105×265; датчика: ⌀12, длина 155	Прибора 5; датчика 0,1	Кишиневский завод «Электроточприбор»	—
«Дермитрон» D-2000 (на базе микропроцессора)	Диэлектрические покрытия на электропроводящих неферромагнитных основаниях; электропроводящие покрытия на диэлектрических основаниях; неферромагнитные покрытия на ферромагнитных основаниях	0—1	1 (инструментальная)	432×305×102	6,8	Фирма «Ю-ПИ-Эй Текнолоджи», США (UPA Techology)	6500 долл.

* Готовится к выпуску.

ПИД-1, выпускаемый Барнаульским филиалом ОКБА. Диапазон измерения 80—110 или 130—160 мкм, погрешность 1,5 % верхнего предела измерения.

В *радиационных толщиномерах* используется регистрируемое детектором ослабление или отражение объектом контроля ионизирующего излучения (табл. 17.10). В качестве источников излучения используются рентгеновские трубки или радиоактивные изотопы, а приемниками служат ионизационные камеры, сцинтилляционные счетчики и полупроводниковые детекторы [17.2]. Рентгеновские измерители толщины применяют для автоматического непрерывного измерения толщины металлической полосы и листа в процессе производства как в холодном, так и в горячем состоянии. Их применение позволяет автоматизировать процесс производства введением обратной связи, охватывающей технологическое оборудование. Для этих же целей применяют и радиоизотопные толщиномеры, однако чаще они используются для измерения толщины металлических покрытий на любых основаниях, если атомные номера материала покрытия и основания различаются на 2—3 единицы. В последнее время появились и рентгеновские измерители толщины покрытий, применяемые для контроля качества миниатюрных объектов, например изделий электронной техники. Фирма «Ю-Пи-Эй Текнолоджи» (США) выпускает настольный автоматизированный на базе микропроцессора рентгеновский толщиномер «Флуородерм» XRF-100, с узким (около 0,3 мм) пучком излучения и автоматическим перемещением стола с ОК по заданной программе с шагом 1 мкм.

Таблица 17.9. Технические данные магнитных толщиномеров

Тип прибора	Диапазон измерения толщины T, мм	Погрешность измерения	Способ измерения	Габариты, мм	Масса, мм	Изготовитель	Цена, руб.
МТА-2М*	Неферромагнитных покрытий на ферромагнитной основе 0—0,3	От 2 до 18 мкм в зависимости от T	Магнитоотрывной	85×35×60	0,23	Минский часовой завод	75
МТА-3М*	Никелевых покрытий на неферромагнитной основе 0,002—0,024	1,5 мкм	»	85×64×30	0,22	То же	75
МТ-20Н**	0—2 (4 поддиапазона)	10%	Индукционный	350×380×150	7	Московский опытный завод «Контрольприбор»	250
МТ-30Н**	0—1 (2 поддиапазона)	5%	»	110×135×210	3	То же	165
МТ-41НЦ	0—12	5%	»	127×200×280	3,5	»	400

* Планируется выпуск с 1985 г.
** Намечен к снятию с производства в 1984 г.

Таблица 17.10. Технические данные радиационных толщиномеров

Тип прибора	Источник излучения	Объекты контроля	Пределы измерения толщины T, мм	Погрешность, %	Габариты измерительного блока, мм	Масса измерительного блока, кг	Цена, руб.
ИТХ-5736*	Рентгеновская трубка	Холодная стальная полоса шириной до 1700 мм	0—12 (7 диапазонов)	1, но не менее 5 мкм	2000×400×1550	800	14 700
ИТГ-5688*	То же	Горячая (до 1200 °С) металлическая полоса шириной до 1700 мм	0—12 (6 диапазонов)	1, но не менее 12 мкм	3100×560×2300	1300	16 000
ТПРУ-1	^{85}Kr ^{90}Sr ^{147}Pm	Гальванические и другие покрытия на любом основании, если атомные номера покрытия и основания различаются не менее чем на 3	0,1—100 (3 диапазона)	1 при $T>10$, 10 при $T<3$	150×350×414	15	8 000
ИТП-5705	^{85}Kr ^{90}Sr	Оловянные, алюминиевые и цинковые покрытия на стальной ленте	0,4—2 (олово) 3—20 (алюминий) 10—50 (цинк) 70—200 (полиэтилен)	0,05 мм 0,15 мм 2 мм 5 мм	472×362×290	50	10 000

* Изготовитель — кишиневский завод «Электроточприбор».

Прибор позволяет измерять толщину золота или серебра на никеле или коваре, никеля на стали или меди, серебра на меди и т. д., запоминая до девяти калибровочных кривых и производя статистическую обработку результатов серии измерений. Стоимость прибора 35 тыс. долл. Эта же фирма выпускает радиоизотопные толщиномеры покрытий, наиболее совершенный из них — «Микродерм» МР-800 состоит из базового прибора с микропроцессором, дисплея, блока алфавитно-цифровой печати и четырех измерительных зондов. Он позволяет измерять толщину золота, серебра, никеля, родия, олова, меди, фоторезиста и других материалов на разных основаниях при разнице в атомных номерах покрытия и основания в 2 единицы. Прибор запоминает 14 градуировочных кривых (получаемых по трем или четырем точкам на образцах) для разных сочетаний материалов покрытия и основания, работает в диалоговом режиме, производит статистическую обработку серии измерений. Цена полного комплекта около 20 тыс. долл., базовый прибор стоит около 10 тыс. долл. Применяется для измерения толщин покрытий на участках с минимальной площадью около 1 мм^2.

Приборы для контроля физико-механических свойств

Приборы этого типа называют еще структуроскопами, так как физико-механические свойства и характеристики ОК (твердость, прочность, пластичность и т. п.) тесно связаны с их структурой (размеры и форма зерна в металлах и сплавах, анизотропия) [17.2]. В табл. 17.11 приведены данные ультразвуковых, вихретоковых и магнитных структуроскопов. В *акустических приборах* используется связь физико-механических свойств ОК со скоростью распространения и затухания ультразвука. Они чаще всего используются для определения размеров зерна в металлах и сплавах, для обнаружения межкристаллитной коррозии, для определения упругих постоянных и т. д. [17.2].

Вихретоковые приборы используют для сортировки ферро- и неферромагнитных ОК по маркам, для контроля правильности режима термической и термохимической обработки деталей, для сортировки по твердости и т. д. [17.2]. Сортировка обычно ведется методом сравнения со стандартным образцом.

Таблица 17.11. **Технические данные приборов для контроля физико-механических свойств**

Тип прибора	Вид контроля	Объекты контроля	Контролируемые параметры	Габариты, мм	Масса, кг	Изготовитель	Цена, руб.
УС-12ИМ	Акустический	Изделия с плоскопараллельными гранями толщиной 0,2—300 мм	Коэффициент затухания УЗ 0,25—10 дБ/см; скорость распространения УЗ 1250—2999 м/с	480×170×480	20	Кишиневский завод «Электроточприбор»	3825
ВС-10 П	Вихретоковый	Ферромагнитные прутки, трубы и мелкие детали ⌀ 6—153 мм	Марка стали, качество термообработки, твердость	Электронного блока: 530×410××400; блока датчика: 310×210××135	Электронного блока 40; блока датчика 20	То же	4600
ВС-11 П*	»	То же ⌀ 5—154 мм; длина более 100 мм	То же	Электронного блока: 495×580××210 (два блока); блока датчика: 220×140×290	Электронного блока 50; блока датчика 7	» »	—
ВФ-30 Э	»	Стальной листовой прокат толщиной 0,08—0,4 мм	Контроль по твердости в диапазоне 40—80 HRC	Электронного блока: 480×360××200; датчика. 100×450×300	110 (общая)	Московский опытный завод «Контрольприбор»	1300
КИФМ-1	Магнитный	Ферромагнитные стальные и чугунные изделия произвольной формы	Качество термической и термохимической обработки через связь с коэрцитивной силой в диапазоне 1,5—44 А/см	Блока измерения: 300×210××330; датчика: 132×86×75 и 106×74×55	Блока измерения 12; датчиков 1,5 и 1	То же	500

* Готовится к выпуску взамен ВС-10П.

Магнитные приборы применяют для сортировки ферромагнитных ОК по твердости, размерам зерна, анизотропии свойств, содержанию примесей (например, углерода). Чаще других для этих целей используются коэрцитиметры (см. § 16.7), основанные на корреляции между коэрцитивной силой и контролируемыми параметрами ОК [17.2].

К электрическим приборам относится выпускаемый Запорожским опытным заводом дефектоскопии термоэлектрический прибор ТЭП-10К, предназначенный для сортировки металлов и сплавов по маркам (химсоставу). Прибор измеряет термо-ЭДС в диапазоне $-5 \div +5$ мВ между специально нагреваемым до 80—120 °С электродом и ОК. При габаритах 290×152×324 мм и массе 7,5 кг он стоит 671,5 руб.

Приборы для контроля электрофизических параметров

К ним относятся измерители удельной электрической проводимости γ, диэлектрической проницаемости ε_r и тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$.

Вихретоковые измерители удельной электрической проводимости позволяют бесконтактно измерять γ неферромагнитных проводниковых материалов: металлов, сплавов и графита (табл. 17.12); сортировать их по маркам, по результатам термической и термохимической обработки; обнаруживать шлифовочные прижоги [17.2, 17.6, 17.7]. Все эти применения возможны благодаря корреляции между γ и химическим составом, структурой и наличием механических напряжений в ОК. Возможен контроль под слоем диэлектрического покрытия, смазки, окислов толщиной до 0,1 мм.

Для измерения электрофизических параметров диэлектриков—ε_r и $\operatorname{tg}\delta$ или комплексной диэлектрической проницаемости $\underline{\varepsilon}_r$ в Институте механики полимеров АН Латвийской ССР (Рига) разработаны и выпущены опытным производством малые партии приборов с электроемкостными преобразователями (табл. 17.13) [17.8]. Эти приборы позволяют определять ε_r при одностороннем доступе к ОК с компенсацией влияния неровностей поверхности в пределах 0,1—0,3 мм.

Параметры слоев полупроводниковых структур контролируют приборы, разработан-

Таблица 17.12. **Технические данные вихретоковых измерителей удельной электрической проводимости, выпускаемых Запорожским опытным заводом дефектоскопии**

Тип прибора	Пределы измерения, МСм/м	Погрешность, %	Допустимый зазор между датчиком и ОК, мм	Минимальная толщина ОК, мм	Диаметр зоны контроля, мм	Габариты, мм	Масса, кг	Цена, руб.
ВЭ-20 Н	8—55	3	0,1	1	20	170×230×110	4	215
ВЭ-21 Н	1—8	3	0,1	1	20	170×230×110	4	220
ВЭ-30 НЦ* (цифровой)	0,5—60	2%+0,2МСм/м	0,3	1	10	—	—	—

* Готовится к выпуску с 1985 г. взамен ВЭ-20Н и ВЭ-21Н.

Таблица 17.13. **Технические данные измерителей диэлектрической проницаемости, разработанных Институтом механики полимеров АН Латвийской ССР**

Тип прибора	Пределы измерения ε_r	Погрешность	Минимальная площадь измерения, см²	Минимальная толщина ОК, мм	Габариты, мм	Масса, кг
ИДП-7	1—10	5 %	8	20	315×240×100	—
7211	1—6 (при $tg\delta \leqslant 0{,}1$)	$0{,}05\varepsilon_r+0{,}02$	36	15	280×100×380	7
7209	1—8 (при $tg\delta \leqslant 0{,}1$)	$0{,}05\varepsilon_r+0{,}02$	36	1	380×145×330	10,5

ные в Физико-энергетическом интитуте АН ЛатвССР и выпущенные опытными партиями Экспериментальным электронно-механическим заводом этого института [17.9]. Эти приборы предназначены для измерения толщины и удельного электрического сопротивления полупроводниковых эпитаксиальных слоев (ПКП-2), сопротивления квадрата поверхности диффузионных структур кремниевых тиристоров (СВА-3МС) и солнечных элементов (СВП-4) и работают в восьмимиллиметровом диапазоне волн с рупорными излучателями и приемниками. Для измерения удельного сопротивления полупроводниковых пластин толщиной 0,3—1 мм диаметром более 1 мм в диапазоне 0,5—6 Ом·м с погрешностью 5 % предназначены приборы с емкостными преобразователями, работающие на частотах 120—180 МГц (ВЕИС-2П и ВЕИС-3П). Приборы ВИИС-2П, ВИИС-3П, ВИИС-4 с индуктивными преобразователями, работающими на частоте 120 МГц, предназначены для контроля поверхностного сопротивления квадрата поверхности сильнолегированных низкоомных диффузионных слоев кремниевых силовых приборов в диапазоне 0,3—30 Ом и удельного сопротивления полупроводниковых пластин минимальной площадью 1 см² в диапазоне 10^{-7}—$2\cdot10^{-2}$ Ом·м с погрешностью 10 %.

Разработана также серия вихретоковых приборов для измерения толщины вакуумной металлизации и проводимости квадрата поверхности тонких (0,01—0,2 мкм) металлических покрытий на полимерных пленках и конденсаторной бумаге (ВИМП-2, ВИМП-3, ВИМП-1 и ВИМП-4).

17.3. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРОВОДНИКОВЫХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ

Контроль проводниковых и полупроводниковых материалов по удельной электрической проводимости

Удельная электрическая проводимость γ (или удельное сопротивление $\rho=1/\gamma$) — важный и во многих случаях определяющий параметр проводниковых и полупроводниковых материалов. Удельное сопротивление медных и алюминиевых слитков, из которых изготавливают электрические провода и кабели, определяет сопротивление единицы длины последних, которое строго регламентируется техническими условиями. То же относится к проводам из сплавов высокого электрического сопротивления. Удельное сопротивление материала графитовых и меднографитовых контактных щеток определяет их сопротивление, от которого зависит температурный режим их работы.

Значением ρ определяются свойства полупроводниковых материалов и структур. В тех случаях, когда можно получить линейно-протяженные образцы материалов в виде полос, лент, проводов постоянного сечения и достаточно точной геометрии, возможно измерение ρ или γ, например, с помощью двойных мостов (см. § 6.4). Однако такие образцы могут быть получены не всегда, они должны быть метрологически аттестованы по геометрии, кроме того, измерение дает среднее значение ρ или γ по всему образцу, не обнаруживая возможных вариаций ρ или γ по длине образца и по его сечению. Бесконтактное измерение γ или поверхностного сопротивления R_S (для тонких ОК) свободно от этих недостатков.

Для бесконтактного измерения γ проводниковых материалов применяют вихретоковые измерители удельной электрической проводимости серии ВЭ (см. табл. 17.12). Они позволяют измерять γ с погрешностью 2—3 % на участке ОК диаметром 10—20 мм при минимальной толщине ОК 1 мм, причем измерения возможны под слоем окислов, окалины, масел, красок толщиной до 0,1—0,3 мм.

Приборы серии ВЭ успешно применяются также для контроля и разбраковки проводниковых материалов и изделий из них по маркам сплавов. Эта задача возникает в тех случаях, когда есть вероятность ошибки в марке материала, из которого изготовлены детали ответственного назначения. Зная значения γ, соответствующие той или иной марке и приводимые в литературе, например в [17.6, 17.7, 17.10], можно определить марку.

Измерение γ графитов можно вести приборами ВЭ-21Н, ВЭ-30НЦ, а также ранее выпускавшимся прибором ИЭ-20 [17.6], у которого диапазон измерения γ составляет 0,002—0,5 МСм/м. Для разбраковки угольных щеток по величине γ применяют вихретоковые приборы с проходными преобразователями [17.11].

Для измерения γ полупроводниковых материалов и структур в процессе производства полупроводниковых приборов применяют радиоволновые, вихретоковые и электроемкостные приборы [17.9]. С помощью радиоволнового прибора ПКП-2 измеряют полное комплексное сопротивление $\underline{Z}$ однородных кремниевых монокристаллов и пластин по отраженному сигналу на волне длиной 8 мм. По $\underline{Z}$ с помощью градуировочных кривых находят ρ,

значения которого могут быть в пределах 10^{-6}—10^{-1} Ом·м. По значениям комплексного коэффициента пропускания трехсантиметровых волн через полупроводниковые пластины, определенного приборами типа СИМП [17.9], измеряющими $\underline{Z}$ в диапазоне 0,01—4 кОм, раздельно контролируют толщину и γ пластин. Параметры пластин можно измерить также приборами типов ВЕИС и ВИИС на частотах 120—180 МГц.

Приборы ПКП и СВП позволяют контролировать также параметры эпитаксиальных слоев на исходной полупроводниковой основе. Параметры диффузионных структур силовых кремниевых приборов, кремниевых и германиевых интегральных схем и кремниевых солнечных элементов контролируются радиоволновыми и вихретоковыми приборами на разных стадиях технологического процесса. Радиоволновые приборы серии СВП (см. § 17.2) применяют для измерения поверхностного сопротивления R_S диффузионных слоев, например p^+-p-слоев силовых приборов, p^+-p-n -n^+-структур. Значение R_S низкоомных диффузионных слоев кремниевых тиристорных структур определяют приборами типа ВИИС. Все описанные измерения выполняются с помощью предварительно построенных по образцам градуировочных графиков.

Дефектоскопия и контроль размеров проводников

Для дефектоскопии проволоки, полых проводников обмоток мощных электрических машин, медных шин, контактных проводов и других проводников применяют вихретоковые, тепловые, акустические приборы НК. Дефекты проволоки из тугоплавких металлов (вольфрам, молибден) и сплавов обнаруживают вихретоковыми дефектоскопами ВД-20П (выпускали до 1983 г.), ВД-23П (см. табл. 17.3) [17.12]. Контроль ведется в процессе перемотки проволоки со скоростью до 3 м/с без снятия графитовой смазки. Прибор обнаруживает расслой (протяженные узкие трещины), возникающий при нарушении режима волочения проволоки на волочильном стане и приводящий к браку при спирализации проволоки для изготовления подогревателей катодов электронных приборов и нитей ламп накаливания, а также к выходу из строя электровакуумных приборов из-за натекания воздуха в колбу прибора через трещины проволочных выводов.

Приборы типа ВД-23П применяют также и для контроля проволоки из других металлов и сплавов: меди, аустенитной стали и т. п. Для контроля ферромагнитной проволоки (ферритная сталь, ковар, пермаллой, никель) применяется ее намагничивание до состояния, близкого к насыщению, магнитным полем постоянных магнитов.

Для дефектоскопии проволоки используют также ультразвуковые приборы в иммерсионном варианте [17.13].

Для непрерывного автоматического измерения диаметра проволоки применяют фотоэлектрические и электроемкостные приборы [17.2]. Вихретоковые приборы с накладными преобразователями применяют для бесконтактного непрерывного измерения ширины металлических лент.

17.4. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИХ НИХ

Для контроля сплошности изоляционных (диэлектрических) покрытий на проводящих поверхностях применяют электроискровые дефектоскопы (ДИ-74, ДЭП-1, ДЭП-2). Толщину диэлектрических покрытий на проводящих неферромагнитных объектах измеряют вихретоковыми толщиномерами ВТ-10НЦ. Толщиномеры типа «Дермитрон» позволяют измерять толщину диэлектрических покрытий на площадке менее 1 мм^2 (см. табл. 17.8).

Для контроля качества диэлектриков применяют электроемкостные измерители диэлектрической проницаемости (см. табл. 17.13), радиоволновые (СН-30АФ), радиационные (см. табл. 17.5, 17.6), акустические (см. табл. 17.1, 17.2) и тепловые дефектоскопы. По значениям относительной диэлектрической проницаемости ε_r определяют качество изолирующих материалов, а также такие их физико-механические характеристики, как, например, прочность на изгиб [17.8]. Радиоволновые приборы применяют для обнаружения расслоений и непроклеев в слоистых пластмассах и композиционных материалах на их основе, например в сотовых конструкциях на основе стеклопластиков [17.21]. Радиационные дефектоскопы применяют для контроля печатных плат (рентгенотелевизионные микроскопы), для обнаружения дефектов пропитки трансформаторов и заливки сложных корпусов битумным компаундом, для обнаружения отверстий и пор в пропитанной воском конденсаторной бумаге или полистирольной пленке (нейтронные радиографы) [17.4].

Акустические дефектоскопы применяют для контроля физико-механических характеристик пластиков и композиционных материалов на их основе (дефектоскопы звукового диапазона типа АД, см. табл. 17.2), керамики и металлокерамики, фарфора и стекла (ультразвуковые дефектоскопы, см. табл. 17.1). Например, ультразвуковые дефектоскопы применяют для контроля открытой пористости фарфорового тела опорных стержневых изоляторов на напряжение 110 кВ по скорости распространения ультразвука при продольном прозвучивании [17.22]. Ультразвуковой контроль позволяет заменить трудоемкий и длительный процесс фуксинных проб, основанный на контроле глубины проникновения красящего вещества — фуксина в тело изолятора при выдержке последнего под высоким давлением в фуксиновой ванне в течение нескольких часов с последующим отрезанием образца от торца изолятора.

Тепловые дефектоскопы — радиометры и тепловизоры — применяют для контроля одно- и многослойных изделий из стеклопластика, пенопласта и других диэлектрических материалов, в том числе печатных плат, антенных обтекателей из радиопрозрачных материалов и т. д. [17.4, 17.21].

17.5. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Сварные соединения широко применяются в электротехнической и электронной отраслях промышленности. От их качества зависит надежность многих видов приборов и оборудования. Нарушения сплошности сварных соединений (дефекты) классифицируют в соответствии с рекомендацией СЭВ по стандартизации РС 2192-72 и по ГОСТ 19232-73.

Влияние дефектов на работоспособность сварных соединений определяется многими конструктивными и эксплуатационными факторами. Так, например, при статической нагрузке и пластичном материале влияние размера непровара на потерю прочности примерно пропорционально относительному его размеру или площади. При малопластичном материале, а также при динамической или вибрационной нагрузке влияние дефектов усиливается.

Для контроля сварных соединений рекомендуются следующие виды НК: акустический, радиационный, магнитный, проникающими веществами (ГОСТ 3249-79).

Акустический контроль сварных соединений проводят с помощью универсальных дефектоскопов (см. табл. 17.1), как правило, эхо-методом. Угол ввода акустических колебаний выбирают так, чтобы расстояние от искателя до сварного шва было минимальным, а направление акустического луча — как можно ближе к нормали по отношению к сечению, в котором площадь ожидаемых дефектов максимальная. Контроль ведут по схеме рис. 17.2, *а*, а для повышения надежности контроля в процессе сканирования искатель непрерывно поворачивают на угол $\varphi = 10 \div 15°$ (рис. 17.2, *б*) и шов прозвучивают с двух сторон [17.14]. Швы нахлесточных соединений контролируют со стороны основного листа однократно отраженным лучом (рис. 17.3). Швы контактной сварки проверяют эхо-методом, а сварные точки — зеркально-теневым. При этом дефекты типа слипания не выявляются. Они могут быть обнаружены вихретоковыми дефектоскопами.

Радиационный контроль сварных соединений регламентирован ГОСТ 7512-75. Используются рентгеновские дефектоскопы, гамма-дефектоскопы и ускорители (см. табл. 17.5, 17.6). На рис. 17.4 показаны некоторые стандартные схемы просвечивания сварных конструкций. Время просвечивания выбирают либо по номограммам экспозиции, либо с помощью автоматических экспонометров [17.2]. На снимках выявляются трещины и непровары, шлаковые включения, поры, газовые включения и другие дефекты. Относительная чувствительность контроля составляет 1—2 % или 10 пар линий на 1 мм. Для повышения надежности обнаружения дефектов применяют просвечивание одного участка шва с нескольких направлений.

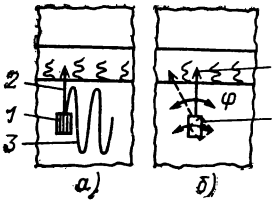
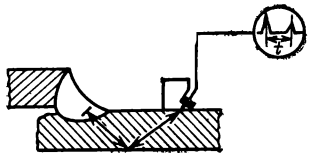


Рис. 17.2. Схема ультразвукового контроля стыкового сварного шва: *1* — искатель; *2* — ультразвуковой луч; *3* — траектория искателя

Рис. 17.3. Схема ультразвукового контроля сварного шва нахлесточного соединения



Магнитный контроль сварных соединений используют для выявления дефектов ферромагнитных объектов. Наибольшее применение находит магнитографический метод контроля. Магнитографические дефектоскопы используются для контроля сварных швов трубопроводов и других ОК больших размеров.

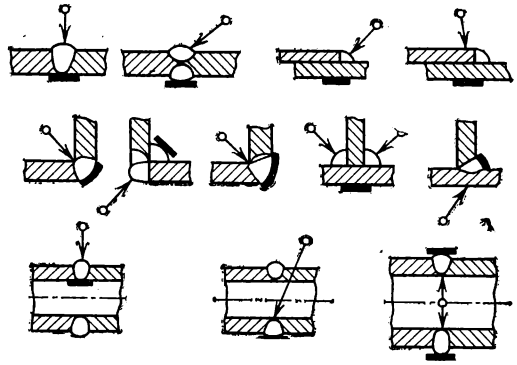


Рис. 17.4. Схемы просвечивания сварных конструкций

Магнитопорошковый метод для контроля сварных швов применяют ограниченно, в основном для контроля швов, прошедших зачистку.

Капиллярные методы эффективны при контроле швов со снятым усилением и шероховатостью поверхности не ниже пятого класса. Швы с несколько большей шероховатостью можно контролировать люминесцентным методом, который имеет наивысшую чувствительность; обнаруживаются дефекты с шириной раскрытия 1—2 мкм и глубиной 10—15 мкм.

Контроль течеисканием применяется для проверки герметичности сварных соединений. При обнаружении утечек дефектные места заваривают после предварительной вырубки или высверливания, а затем испытание на герметичность повторяют.

17.6. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА В ПРОИЗВОДСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Контроль качества в электромашино-, электроаппаратостроении и кабельной промышленности

В связи с ростом мощности крупных электрических генераторов до 1000—1200 МВт возросли нагрузки на активные материалы. Некоторое снижение надежности, наблюдавшееся в период освоения энергоблоков большой мощ-

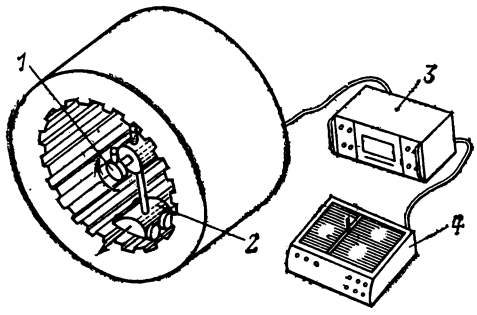


Рис. 17.5. Схема контроля сердечника статора мощного электрического генератора тепловизором «Статор»

ности, побудило к поиску и внедрению новых способов НК и технической диагностики в процессе производства и испытания машин. Замыкания листов стали сердечника статора превращаются в очаги недопустимых перегревов в работающей машине и поэтому должны быть обнаружены после сборки мощного турбогенератора. Для этой цели применяют специально разработанный тепловизор-дефектоскоп «Статор» (рис. 17.5) [17.15]. Он состоит из оптической головки *1* с круговым сканированием, установленной на самоходном шасси *2*, блока *3* электроники и индикации и блока *4* электрохимической записи для получения термограмм. Оптическая головка устанавливается на радиальной телескопической опоре коаксиально с внутренней поверхностью статора и сканирует поверхность статора по окружности. Самоходное шасси шагами движется вдоль зубцов статора так, чтобы охватить всю ее поверхность. Контроль всей поверхности статора занимает несколько минут. Разрешающая способность тепловизора по температуре не хуже 1 °С, линейная разрешающая способность 5—10 мм. Шасси перемещается со скоростью 0,6 м/мин по внутренней поверхности предварительно разогретого (индукционным током частоты 50 Гц) статора внутренним диаметром 0,9—3 м. Дефектные участки имеют температуру на несколько градусов выше средней, что фиксируется на термограммах. В настоящее время все выпускаемые заводами мощные генераторы подвергаются тепловизионному контролю. Результаты сопоставления термограмм, записанных при выпуске генератора, с термограммами, полученными при проведении капитального ремонта на электростанциях, позволяют судить о процессах старения межлистовой изоляции и изменении плотности запрессовки сердечника и могут служить основой для оценки ресурса машины.

Другая важная проблема при изготовлении мощных турбо- и гидрогенераторов — контроль качества изоляции стержней обмоток статоров. Для этих целей используются радиоволновые дефектоскопы СД-12Д, СД-12К с длиной волны 3 см и СН-30П с длиной волны 8 мм. Они позволяют обнаруживать неоднородности изоляции, вызванные ее отслоением от меди проводников или расслоением изоляции [17.16].

В производстве электротехнической стали находят применение неразрушающие методы контроля ее свойств. Основные измерения характеристик и параметров стали выполняются известными (см. § 6.6) методами выборочно на образцах, вырезанных из листов или рулонов стали. Однако это не гарантирует необходимого уровня качества всей продукции и требует больших трудозатрат. Поэтому очевидна актуальность использования НК для решения этой задачи.

Магнитный текстурометр, разработанный в Институте физики металлов УНЦ АН СССР, применяется на ряде металлургических заводов для непрерывного контроля кристаллографической текстуры движущейся полосы анизотропной высококачественной электротехнической стали марок 3411, 3414, 3415 [17.17]. Контролируемая лента проходит между полюсами П-образных электромагнитов, обмотки которых питаются током промышленной частоты. Измерительные катушки устанавливаются над контролируемой лентой так, чтобы измерять составляющую намагниченности, перпендикулярную приложенному магнитному полю. Лист намагничивают под углом 22—30° к направлению прокатки. Сигналы измерительных катушек усиливаются, интегрируются, детектируются и записываются самописцем. Применение текстурометра позволяет обнаруживать участки полосы с плохой и неоднородной текстурой, у которых параметр B_{2500} (магнитная индукция при $H=2500$ А/м) выходит за допустимые пределы.

Для контроля механических напряжений в листах трансформаторной стали, вызывающих, как известно, изменение ее магнитных свойств, в Липецком политехническом институте разработан магнитный прибор с накладным датчиком [17.18]. Регистрируя переменное напряжение измерительной катушки, установленной в зазоре между магнитопроводом возбуждающей катушки и контролируемым листом, судят об уровне механических напряжений в листе. Внедрение прибора на Новолипецком металлургическом заводе позволило оперативно обнаружить остаточные внутренние механические напряжения в трансформаторной стали, вызванные нарушениями режима отжига и увеличивающие удельные потери в стали.

Для обеспечения высокой надежности электромагнитных реле применяют НК их деталей и узлов, а также готовых изделий. Например, листы из тугоплавких металлов, применяемых для изготовления контактов реле, контролируют вихретоковыми дефектоскопами типа «Лист» с вращающимися накладными преобразователями. Для обнаружения расслоений в вырубленных из этих листов контактах используют специализированный вихретоковый дефектоскоп с проходным преобразователем, через который контакты пролетают, ссыпаясь из бункера. Реле в сборе контролируют рентгеновскими методами. При контроле малогабаритных реле с помощью рентгенотелевизионного интроскопа МТР-3И (см. табл. 17.6) обнаруживают следующие дефекты: обрыв обмоток, плохую пайку выводов, сваривание контактов, неплотное прилегание контактов, прогибы контактных пластин, деформации пружин [17.4].

Приборы НК эффективно применяются при динамических испытаниях электрических машин в процессе их доводки. Механическое состояние ротора и механические факторы коммутации коллекторных машин — профиль коллектора, общее биение его поверхности, пара-

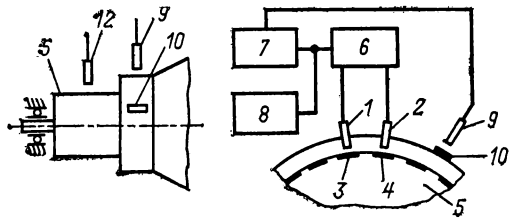


Рис. 17.6. Схема контроля механических факторов коммутации роторов коллекторных электрических машин вихретоковым прибором «Профиль»

метры вибрации элементов щеточно-контактного узла и другие параметры, характеризующие качество коммутации и динамическую устойчивость ротора и коллектора, успешно контролируют вихревыми приборами НК [17.19].

Рисунок 17.6 иллюстрирует принцип действия прибора типа «Профиль», разработанного Куйбышевским авиационным институтом для контроля механических факторов коммутации и механического состояния роторов коллекторных электрических машин [17.19]. Вихретоковые накладные преобразователи (ВТП) *1* и *2* устанавливаются с некоторым «зазором безопасности» над двумя соседними пластинами *3* и *4* коллектора *5*. Импульсы сигналов, амплитуды которых пропорциональны зазору между пластинами и ВТП, поступают от последних в электронный блок *6*, на выходе которого включены осциллографический индикатор *7* и аналоговый регистратор *8*. Разность ΔA амплитуд импульсов ВТП характеризует профиль коллектора, а разность амплитуды A импульса одного из ВТП и ΔA пропорциональна биению коллектора без учета его профиля.

Синхронизация развертки и осциллографического индикатора *7* с вращением ротора достигается вихретоковым датчиком *9* синхронизации, установленным над металлической пластиной *10*, наклеенной на ротор. Для определения амплитуд вибрации элементов щеточного узла ВТП устанавливают над соответствующим элементом. В приборах «Дельта» и «Пик-2М» используется тот же принцип измерения, но применен дифференциальный ВТП, заменяющий два ВТП прибора «Профиль».

Технические данные прибора «Дельта»

Чувствительность к зазору на экране осциллографического индикатора, мм/мкм	Не менее 1
То же по выходу на гальванометр светолучевого осциллографа, мА/мкм	2,5
Погрешность измерения выступания ламелей коллектора, %	10
Максимальный зазор между ВТП и поверхностью коллектора, мкм	300
Минимальная ширина контролируемых ламелей, мм	1
Минимальный зазор между пластинами коллектора, мм	0,5
Диапазон частот следования ламелей, Гц	30—30 000
Допустимая температура коллектора, °С	+200
Габариты, мм:	
ВТП	⌀20, длина 85
электронного блока	360×180×300
Масса, кг	8

Для автоматизации процесса контроля разработана система аттестации коллекторных электрических машин [17.19]. В ней применяются семь ВТП. Система позволяет контролировать и регистрировать следующие параметры: общее биение поверхности коллектора; относительное выступание соседних пластин; максимальный перепад между соседними пластинами коллектора за один оборот ротора; среднеквадратическое отклонение перепада соседних панелей; овальность и эксцентриситет коллектора; частоту вращения вала ротора; разность частот вращения вала в два последовательные момента времени; параметры вибрации элементов конструкции в четырех точках.

Все описанные приборы и устройства применимы также для контроля механического состояния роторов электрических машин. В этом случае ВТП устанавливают над зубцами ротора.

Для бесконтактного оперативного контроля биений поверхности коллектора или ротора применяется пробник типа ИФК-3 (рис. 17.7) [17.19]. При испытаниях пробник подводится к контролируемой поверхности до упора стопором в деталь, относительно которой необходимо контролировать биение. Результаты измерения отображаются на экране осциллографа.

Параметры вибрации электрических машин и аппаратов измеряют бесконтактным вихретоковым виброметром типа ВВВ-302 (выпускается Запорожским опытным заводом дефектоскопии с 1981 г.) Виброметр ВВВ-302 измеряет виброперемещения в диапазоне 1 — 1000 мкм с погрешностью 10 % или линейные перемещения (при отсутствии виброперемещений) до 1 мм с погрешностью 5 %. Габариты прибора 350×250×350 мм, масса 17 кг, цена 2350 руб. [17.20].

Для контроля механического состояния роторов турбомашин в процессе их эксплуатации киевским ПО «Веда» выпускается комплекс контрольно-сигнальной аппаратуры типа ВВК [17.20]. В него входят приборы для измерения: среднеквадратического значения виброскорости на опорах вала в диапазоне 10 и 30 м/с (ВВК-331); относительного виброперемещения вала в диапазоне 250 и 450 мкм (ВВК-332); «прогиба» вала до 500 мкм, осевого сдвига вала до 2,5 мм; разности расширений элементов конструкции от 1,5 до 80 мм (ВВК-333). Погрешность измерения 10 %, а для разности расширений 5 %. Комплекс вы-

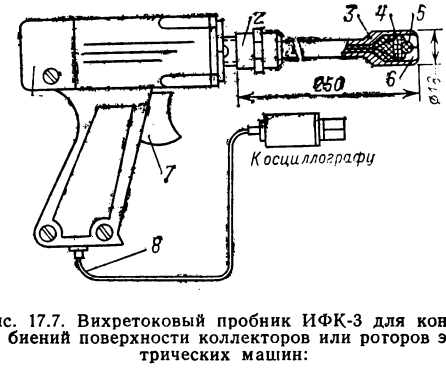


Рис. 17.7. Вихретоковый пробник ИФК-3 для контроля биений поверхности коллекторов или роторов электрических машин:

1 — корпус; *2* — соединитель; *3* — щуп; *4* — магнитопровод ВТП; *5* — вставка; *6* — обмотка ВТП; *7* — выключатель; *8* — кабель

пускается в различной конфигурации в виде стоек и настольных приборов, масса каждой стойки не более 100 кг, цена комплекса от 3,5 до 15 тыс. руб.

Для обеспечения высокого качества и надежности силовых и связных кабелей применяют различные виды НК. Для автоматического измерения диаметра жил кабелей применяют оптические (фотоэлектрические) приборы, а также приборы с контактными индуктивными датчиками. Дефекты в жилах кабелей могут быть обнаружены вихретоковыми дефектоскопами с проходными преобразователями (см. табл. 17.3). Дефектоскопы с накладными вихретоковыми преобразователями целесообразно использовать для контроля качества алюминиевой и стальной ленты, применяемой для создания оболочки силовых кабелей. Актуальна задача измерения разнотолщинности свинцовых и алюминиевых оболочек силовых кабелей. Она может быть успешно решена применением вихретоковых толщиномеров, что позволяет получить значительную экономию дорогостоящих материалов. Герметичность оболочки силовых кабелей проверяют методами течеискания по изменению манометрического давления в процессе испытаний.

Контроль качества в электронной промышленности и электроприборостроении

В связи с быстрым ростом сложности, миниатюризации и функциональной значимости электронной аппаратуры возникали большие трудности обеспечения ее качества и надежности. Традиционные статистические методы оценки качества и надежности требуют большого числа выборок и длительных испытаний и дают только вероятностные характеристики. В повышении качества и надежности большую роль играют следующие виды НК: акустический, радиационный, тепловой, вихретоковый и магнитный [17.4].

Рентгеновские методы НК позволяют обнаружить дефекты в электронных элементах и аппаратах, а также выявлять потенциально ненадежные элементы и детали, которые могут вызвать отказ аппаратуры. Хорошие результаты дает применение рентгенотелевизионных интроскопов, например МТР-3И (см. табл. 17.6), для контроля полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, а также печатных плат и печатных узлов, реле, конденсаторов и резисторов. В гибридных и полупроводниковых интегральных микросхемах обнаруживаются следующие дефекты: обрывы, короткие замыкания и «пережоги» выводов транзисторов, нарушение топологии, прогиб и негерметичность корпуса. В полупроводниковых диодах, стабилитронах и транзисторах выявляют: обрывы внутренних соединений, перекосы пружин относительно корпуса, короткое замыкание выводов; расплавление кристалла и пережоги выводов; наличие посторонних частиц; прогибы и трещины корпуса; уменьшение сечения внутренних выводов.

Рентгенографический способ применяют для обнаружения металлических включений размером 10—20 мкм в изолирующих керамических слоях многослойных цилиндрических металлокерамических изделий, применяемых в

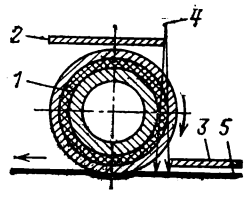


Рис. 17.8. Схема просвечивания среднего керамического слоя трехслойного металлокерамического цилиндра

электронной промышленности [17.23]. На рис. 17.8 приведена схема просвечивания среднего керамического слоя *1* трехслойного металлокерамического цилиндра, закрепленного во вращающихся центрах. Свинцовые шторки *2* и *3* могут перемещаться горизонтально, изменяя ширину щелевой диафрагмы так, чтобы она была меньше толщины контролируемого слоя *1*. Излучение от рентгеновской трубки *4* проходит через слой *1* и попадает на пленку *5*, которая перемещается электроприводом, вращая контролируемый цилиндр. За один оборот цилиндра на пленке получают развертку слоя, на которой видны металлические включения в виде точек. Применяется рентгеновская установка РУП-150/300-10-1 с острофокусной трубкой 0,3БПВ-6-150. Скорость движения пленки и вращения изделия, а также режим просвечивания выбираются в зависимости от толщины и материала контролируемых слоев. Диаметр изделий 15—32 мм, длина 300—600 мм, габариты установки 800×500×250 мм, масса 40 кг. Для обнаружения и измерения размеров дефектов на пленке после проявления применяется микроскоп МБС-2. Применение установки повышает производительность контроля в 10—12 раз. С помощью рентенотелевизионного интроскопа МТР-3И можно обнаружить дефекты многослойных печатных плат; короткие замыкания между дорожками из-за недотравления или растекания припоя между слоями; уменьшение и увеличение ширины дорожек, их разрывы; отсутствие и неравномерность покрытия припоем или серебром; расслоения диэлектрика и отслоения дорожек; смещение контактных площадок относительно отверстий. Возможен контроль печатных плат с числом слоев до 16.

Для обеспечения высокого качества и надежности печатных плат, особенно многослойных, необходимо контролировать толщину металлизации отверстий в них как монтажных, так и соединительных. Слой меди в отверстиях должен иметь толщину 25 мкм. При его снижении до 5—10 мкм резко снижается надежность соединения из-за возможного «пережога» при пайке, разрушения при окислении в процессе эксплуатации, снижения механической прочности. Увеличение толщины до 40—50 мкм приводит к рыхлоте покрытия. Для контроля толщины покрытия применяют выборочные весьма трудоемкие и дорогие разрушающие испытания. Для неразрушающего измерения толщины металлизации отверстий применяют электрические (контактные) и вихретоковые (бесконтактные) приборы. Приборы типа «Кавидерм» фирмы «Ю-Пи-Эй Текнолоджи» (США) измеряют контактным способом электрическое сопротивление трубки металлизации, и путем пересчета позволяют найти значение толщины покрытия. В последней модели этого прибора (CD-7) применен микропроцес-

сор, выполняющий расчетные операции, а также самокалибровку. Минимальный диаметр контролируемых отверстий 0,38 и 0,62 мм (для разных зондов); толщина платы от 0,38 до 5 мм; максимальный размер платы 600 мм. Габариты прибора 340×270×190 мм, масса 5,2+ +4,4 кг (устройство для установки зондов), стоимость 9000 долл. Для тех же целей в нашей стране выпускаются разработанные в МЭИ вихретоковые измерители толщины металлизации ИТМ-10 и ИТМ-21 (см. табл. 17.8). Примененные в них миниатюрные вихретоковые преобразователи позволяют контролировать отверстия при одностороннем доступе к печатной плате как до травления рисунка проводников, так и после. Контроль толщины металлизации до травления рисунка позволяет обнаружить брак на ранних стадиях технологического процесса, что невозможно при использовании электроконтактных приборов типа «Кавидерм». В приборе ИТМ-21 применен микропроцессор, управляющий его работой, расширяющий его функциональные возможности и выполняющий статистическую обработку результатов серии измерений.

Качество печатных плат, особенно многослойных, проверяется ультразвуковыми дефектоскопами. На дефектограммах обнаруживаются расслоения и пустота в диэлектрике, отслоение проводников от диэлектрика, посторонние включения и т. д. [17.4]. Толщину проводников на плоских поверхностях печатных плат контролируют радиационными толщиномерами типа «Микродерм» (см. § 17.2) и близкими к нему по характеристикам приборами типа «Бетаскоп» фирмы «Х. Фишер» (H. Fischer, ФРГ). Радиационными приборами измеряют также толщину защитного слоя припоя, серебра или золота на проводниках печатных плат.

Для контроля электронных элементов, узлов и изделий широко применяются тепловые методы. Многие дефекты, ошибки в монтаже электронных узлов, не сразу определяемые по электрическим характеристикам аппаратуры, вызывают изменения ее температурных полей. По результатам анализа тепловых полей можно обнаружить ошибки в номиналах параметров элементов, обрывы и короткие замыкания в них, оценить эффективность теплоотвода от тепловыделяющих элементов. Тепловые поля регистрируют контактными методами с помощью термопар, терморезисторов и термоиндикаторов (см. § 17.2) или с помощью тепловизоров. Для поиска неисправностей с помощью тепловизоров применяют метод образцовых термограмм или метод изотерм [17.2, 17.4]. Образцовую термограмму получают на заведомо исправном объекте и с ней сравнивают термограммы контролируемых объектов. Метод изотерм позволяет количественно определить температуру отдельных участков объекта контроля с погрешностью около 0,2 °С.

Качество паяных и сплавных соединений силовых полупроводниковых приборов проверяют ультразвуковыми методами [17.24]. Обнаруживают дефекты типа непропаев и пор диаметром более 1 мм в паяных соединениях кремний—вольфрам.

Качество электровакуумных приборов в значительной степени зависит от герметичности соединения стекла баллона с металлическими выводами, которые обычно изготавливаются из специальной проволоки — платинита. Платинит представляет собой никелевую проволоку, покрытую слоем меди, толщина которого выбрана так, чтобы температурные коэффициенты расширения платинита и стекла были равны. Для оперативного НК толщины медного слоя и его разнотолщинности разработан вихретоковый прибор ПКР-1 с проходным преобразователем, применяемый на заводах — изготовителях платинита.

Для контроля герметичности корпусов приборов и аппаратов применяют методы течеискания. Они основаны на регистрации проникающих сквозь течи веществ и позволяют выявить сквозные дефекты, которые ввиду их малости невозможно обнаружить визуально или другими методами НК. Наиболее совершенны масс-спектрометрические течеискатели, чувствительные элементы которых реагируют на пробное вещество, в качестве которого обычно используется гелий, обладающий высокой проникающей способностью. Масс-спектрометрический гелиевый течеискатель ПТИ-10 позволяет индицировать течи до $6{,}65 \cdot 10^{-13}$ Вт в вакуумированных корпусах, помещенных в атмосферу гелия, или утечки гелия из корпуса в атмосферу до $6{,}65 \cdot 10^{-11}$ Вт [17, 25]. Галогенный течеискатель типа ГТИ-6 фиксирует утечки хладона-12 в атмосферу с чувствительностью $1{,}33 \cdot 10^{-7}$ Вт и парциальное давление газа в вакуумированном объеме $6{,}65 \cdot 10^{-6}$ Па. Манометрические течеискатели обнаруживают разгерметизацию по изменению избыточного давления в корпусе. Они просты в устройстве, но предельная чувствительность не превышает $6{,}65 \cdot 10^{-6}$ Вт [17.26]. При большом объеме контроля применяют автоматизированные установки, в основном масс-спектрометрические и манометрические. Производительность контроля таких установок может доходить до 3000 изд/ч [17.24]. Разгерметизация корпусов может быть обнаружена также по акустическим излучениям, возникающим при истечении воздуха или газа через отверстия. Акустические шумы истечения анализируют методами акустической эмиссии (АЭ) при создании избыточного внутреннего или наружного давления в герметичных объемах. Сигналы АЭ преобразуют в электрические обычно с помощью пьезоэлектрических преобразователей и обрабатывают специальной аппаратурой. Используя метод триангуляции, можно локализовать источник АЭ по сигналам нескольких преобразователей. Обычно аппаратура для испытаний с применением АЭ достаточно сложна и включает в себя ЭВМ [17.27]. С ее помощью обнаруживают не только течи, но и зоны, чувствительные к усталости, а также места зарождения усталостных трещин.

Для диагностики состояния многих приборов и систем эффективен анализ шумов. Акустические шумы используют для диагностики работающих электромеханических устройств (электрических машин, реле, трансформаторов); электрические шумы несут информацию о состоянии электронных приборов (транзисторов, диодов, микросхем). Для измерения и классификации акустических шумов в соответствии с Рекомендациями ИСО 3741—3745 используется аппаратура со специальными процессорами, например типа 7507 фирмы

«Брюль и Кьер» [17.27]. Прогнозировать надежность полупроводниковых приборов удобно по коэффициенту шума $K_ш$, равному отношению действующего значения напряжения шума на испытуемом объекте к действующему значению шума на образцовом безындуктивном резисторе. Превышение экспериментально найденных граничных значений $K_ш$ служит основанием для забракования объекта [17.4].

Эффективное применение НК требует планирования соответствующих мероприятий на всех этапах разработки, производства и эксплуатации оборудования и приборов. В процессе разработки должны быть выбраны методы и средства НК, наилучшим образом обеспечивающие решение задач контроля и диагностики. В свою очередь, этот выбор определяет требования контролепригодности разрабатываемой аппаратуры и накладывает отпечаток на решения, принимаемые разработчиком. На стадии технологической подготовки производства должен быть предусмотрен выбор средств и методов технологического НК материалов, деталей и узлов. И, наконец, при эксплуатации необходимо определить штатные средства НК, обеспечивающие надежность и безопасность работы. Методы и средства НК, методики их применения, правила принятия решений о качестве продукции по результатам контроля и другие моменты должны быть отражены в нормативно-технической документации, включая стандарты на отдельные виды продукции. Широкое внедрение НК в производство позволяет повысить надежность оборудования и приборов и дает большой экономический эффект.

Список литературы

17.1. **ГОСТ 18353-79.** Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.

17.2. **Приборы** для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник в 2-х книгах/Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1976, кн. 1—321 с.; кн. 2 — 326 с.

17.3. **Неразрушающий** контроль качества изделий электромагнитными методами/В. Г. Герасимов, Ю. Я. Останин, А. Д. Покровский и др. М.: Энергия, 1978. 216 с.

17.4. **Неразрушающий** контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры/Под ред. Б. Е. Бердичевского. М.: Советское радио, 1976. 296 с.

17.5. **Некрасов М. М., Платонов В. В., Дадеко Л. И.** Неразрушающие методы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры. Киев: Техніка, 1980. 199 с.

17.6. **Дорофеев А. Л.** Индукционная структуроскопия. М.: Энергия, 1973. 176 с.

17.7. **Наумов Н. М., Микляев П. Г.** Резистометрический неразрушающий контроль деформируемых алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1974. 200 с.

17.8. **Матис И. Г.** Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. Рига: Зинатне, 1982. 304 с.

17.9. **Гаврилин В. В., Григулис Ю. К., Пориньш В. М.** Электромагнитные радиоволновые приборы для контроля слоев полупроводниковых и металлических структур. Рига: Зинатне,1982. 162 с.

17.10. **Неразрушающий** контроль металлов и изделий. Справочник/Под ред. Г. С. Самойловича. М.: Машиностроение, 1976. 456 с.

17.11. **Метод** вихревых токов для контроля производственных параметров/Под ред. Н. Н. Шумиловского. Фрунзе: Илим, 1964. 297 с.

17.12. **ОСТ 11021.006-76.** Проволока из тугоплавких металлов и сплавов для изделий электронной техники. Методы контроля.

17.13. **Веремеенко С. В., Игнатинский И. Л., Мейерсон В. Г.** Ультразвуковая установка для контроля тонкой проволоки и волокон. — Дефектоскопия, 1979, № 5, с. 107—108.

17.14. **Гурвич А. К., Ермолов И. Н.** Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев: Техніка, 1972. 286 с.

17.15. **Тепловая** дефектоскопия статоров мощных турбогенераторов/И. А. Глебов, М. М. Мирошников, В. В. Романов и др. — Дефектоскопия, 1981, № 11, с. 69—75.

17.16. **Амбросович В. Д., Бережанский В. Б., Трусов М. Г.** Контроль изоляции стержней обмоток статоров крупных турбо- и гидрогенераторов СВЧ дефектоскопами. — Дефектоскопия 1979, № 3, с. 82—87.

17.17. **Корзухин Г. С., Чистяков В. К., Пятыгин А. И.** Контроль кристаллографической текстуры в движущейся полосе анизотропной электротехнической стали. — Дефектоскопия, 1981, № 2, с. 28—37.

17.18. **Журавский А. Г., Казаджан Л. Б., Слаута С. П.** Прибор для контроля механических напряжений в трансформаторной стали. — Дефектоскопия, 1983, № 5, с. 34—38.

17.19. **Герасимов В. Г., Клюев В. В., Шатерников В. Е.** Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. М.: Энергоатомиздат, 1983. 408 с.

17.20. **Приборы** и системы для измерения вибрации шума и удара. Справочник, в 2-х томах/Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1978.

17.21. **Потапов А. И.** Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1980. 261 с.

17.22. **Шейкин А. А., Богданов Г. П., Лебедев Л. К.** Контроль пористости опорных стержневых изоляторов с помощью ультразвука. — Дефектоскопия, 1980, № 9, с. 69—75.

17.23. **Саланджьян Г. Л., Цецхладзе Д. Л.** Рентгенография многослойных цилиндрических металлокерамических изделий. — Дефектоскопия, 1978, № 1, с. 103—105.

17.24. **Ультразвуковой** метод контроля паяных и сплавных соединений силовых полупроводниковых приборов/В. В. Зумберов, Е. А. Плотников, В. А. Соков и др. — Дефектоскопия. 1975, № 2, с. 135—137.

17.25. **Левина Л. Е., Сажин С. Г.** Общая характеристика современной техники течеискания. — Дефектоскопия, 1978, № 6, с. 6—9.

17.26. **Средства** контроля герметичности/Под ред. А. С. Зажигина М.: Машиностроение, 1976. 320 с.

17.27. **Кирякин А. В., Железная И. Л.** Акустическая диагностика узлов и блоков РЭА. М.: Радио и связь, 1984. 192 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абсорбции ток 68
Авогадро число 37
Автотрансформаторов обозначения 311, 315
Автоматизация проектирования 235
— эксперимента 166
Автоматизированное рабочее место 239
Автоэлектронная (электростатическая) эмиссия 58
Аккумуляторов обозначения 323
Адаптеры 168
Аддитивные погрешности 180
Активная мощность 38, 82, 101
— проводимость 38, 77
— энергия 82
Активного двухполюсника метод 92
Активное сопротивление 38, 77
Активные двухполюсники 80
— четырехполюсники 123
Акустические дефектоскопы 464
— приборы для контроля физико-механических свойств 471
— толщиномеры 469
Акустический контроль 475
Акустических величин единицы 31
Акцепторные примеси 41
Альни и альнико 459
Альсифер 443, 453
Алюминий и его сплавы 419, 439
Амортизационные отчисления 346
Аморфные магнитные материалы 443, 456
Ампер 33
Ампера определение 25
— сила 143
Амперметры 198, 199, 202, 204
Амплитуда 37, 75
Амплитудно-частотная характеристика 114
Амплитуды коэффициент 101
Аналогия электростатическая 146, 147
Аналоговое подобие 230
Аналоговые измерительные приборы 200
Аналоговых элементов обозначения 336
Аппаратов степени защиты 237
Аппараты коммутирующие. Требования безопасности 359, 360
Аппроксимации функций распределения 189
Аргумент 37
Архитектура экспериментальных комплексов 167
Асботекстолит 391, 392
Асинхронных машин обозначения 313
Ассемблер 168
Атмосфера 29
Атмосферы типы 269
Атомная единица массы 27
Аттестация продукции 352

Б

Баланс мощности 82
Балльно-индексная оценка эффективности 351
Бар 29
Бариевые ферриты 460
Бегущая волна 125
Безопасность электроустановок и электрооборудования 356
Безотказность 276
Беккерель 32
Био — Савара закон 143
Битумы 393, 395
Блокировки распределительных устройств 361
Больцмана постоянная 37
Бромвича интеграл 111
Бронзы 416, 439
Буквенно-цифровые обозначения 311
Буквенные обозначения электрических и магнитных величин 37
Бумаги электроизоляционные 388
Бумажно-бакелитовые намотанные изделия 397

В

Вазелин конденсаторный 284
Валентная зона 40
Вар 33
Вариантов сопоставление 341
Вариаций теорема 94
Варикапа и вариконда обозначения 319, 321
Вариометры 213
Варистора обозначение 318
Варисторы 204
Ватт 36, 30, 31
Ваттметры 204
Ввода устройства 239
Ввода-вывода системы 170
Вебер 34
Веберметры 211
Вейбулла закон 281
Векторного анализа операции 141
Векторные диаграммы 76, 84
Векторный магнитный потенциал 144, 146
Векторы (матрица-столбец) 86
— на комплексной плоскости 76
Величина физическая 177
Вентильные свойства 43
Вероятности интеграл 185
Вероятностный анализ 248
Веса единицы 26
Весовая функция 158
Ветви графа 83
Взаимная замена источников тока и ЭДС 92
— индуктивность 38, 81, 145, 149
— индукция 145
Взаимной индуктивности единицы 34
— — расчет 147
Взаимности теорема 94
Вибрации контроль 477
Вибрационные нагрузки на изделия 272
Видеотерминал 168
Виды измерений 178
Викалой 494
Вина постоянная 37
Винипласт 386
Вихревые токи 50
Вихретоковые дефектоскопы 465
— приборы для контроля механических свойств 471
— толщиномеры 469
Вихри поля 145
Включение и отключение ветвей 114
Вместимости единицы 26, 27, 28
Внешней среды воздействие на изделия 267
Внутренний фотоэффект 48
Возбуждение атома 60
Воздействие тока на организм 357
Воздушных сетей протяженность 8, 12
Волновое сопротивление 35, 123
Волновые уравнения 146
Волны в линии 125
— падающия и отраженная 124
Вольт 33
Вольт-ампер 33
Вольтметры 197, 198, 199, 202, 203, 204
Вольфрамовые контакты 433
Восприимчивость диэлектрическая 38, 1[illegible]
— магнитная 38
Времени единицы 25, 26, 27
Временных характеристик расчет 242
Вторичная электронная эмиссия 59
Входное сопротивление 38, 120, 124
Выделение сигнала 161
Выключателей обозначения 311, 333, 334
Выпрямителей обозначения 311, 322
Выпрямляющие контакты 42
Высококоэрцитивные сплавы 460
Высшие гармоники 999
Вычеты 111
Вычислительная техника 234
Вязкости единицы 26
Вязкость магнитная 50

Г

Газовая постоянная универсальная 37
Газовые лазеры 73
Газоразрядных ламп обозначения 323
Гальваномагнитные тесламетры 212
— эффекты 208
— явления 46
Гальванометра обозначение 320
Гармоник коэффициент 101
Гармоники основная и высшие 99
Гаусс 34, 35
Гаусса теорема 139
— эффект 46, 208
Генераторов обозначение 311
Генри 34
Германий 41, 403
Герц 26
Гетинакс 390, 392
Гильберт 35
Гиратор 118
Гистерезиметры 217
Гистерезиса явления 49, 440
Гистерезисного двигателя обозначение 314
Глухозаземленная нейтраль 358
Годовой экономический эффект 341
Годограф 94
ГОЭРЛО план 7
Государственная система обеспечения единства измерений 176
Гравитационная постоянчая 35
Градиент 141
Градус 27
— Цельсия 25, 30
Графические дисплеи 239
Графический вывод информации 239
Графы сигнальные 94
— схем (цепей) 83
Грэй 32

Д

Давление магнитное 56
Давления единицы 26, 29
Двухполюсники 77, 80, 92
Действие электрического тока на организм человека 357
Действительная часть комплексной величины 76
Действительное значение величины 177
Действующее значение 37, 75 101
Декада 26
Декремент колебаний 38
Делители напряжения 191
Дельта-древесина 391, 392
Дембера ЭДС 48
Дерево графа 83
Деталь 292
Дефектоскопы 464
Децибелл 29, 31
Дешифратора обозначение 327
Джозефсона эффект 54
Джоуль 26, 30, 31
Джоуля — Ленца закон 82, 142
Диаграмм выполнение 337
Диаграммы векторные 76, 84
Дивергенция 141
Динамические характеристики магнитных материалов 441
Диодов обозначения 320, 321, 322
Дипольная поляризация 67
Диполь электрический 140
Дирака функция 112
Дискретизация значений наблюдаемой переменной 160
Дискретные модели 132
Дискретных моделей метод 139
Дисперсия 185
Дисплеи 168, 239
Диффузионное движение ионов 61
Диффузия носителей 44
Диэлектрики 66, 380
Диэлектрическая восприимчивость 38, 141
— проницаемость 38, 67
Диэлектрической проницаемости единицы 33
Длина волны в линии 124
Длинные линии 123
Длины единицы 25, 26, 27
Добавочные резисторы 190
Добротности обозначение 38
Доверительные интервалы 185
Долговечность 277
Доменная структура 49
Донорные примеси 41
Дрейф носителей 44
Дросселей обозначения 316
Дуговой разряд 63
Дырочная электропроводность 41
Дюамеля интеграл 113

Е

Единая энергетическая система СССР 13
Единицы физических величин 24, 177
Емкость 38, 76, 143
— конденсаторов и проводов 146
Емкости электрической единицы 33
Емкостные коэффициенты 142
— элементы 76
ЕСКД 339

Ж

Жаростойкие сплавы высокого электрического сопротивления 427
Железо 444
Жидкие диэлектрики 384
Жидкостные лазеры 73

З

Зависимые (управляемые) источники тока и ЭДС 81
Заграждающий фильтр 121
Заземление 367
Заземлители 369
Заземляющее устройство 358
Заземляющие ножи у разъединителей 361
Заливочные компаунды 393, 394, 395
Зануление 367
Запрещенная зона 40
Заряд электрона (заряд элементарный) 45
Заряда единицы 33
Затраты на разработку 342
— по эксплуатации 346
— приведенные 342
— текущие 342
Защита от воздействия электромагнитных полей 362
— электрооборудования от внешних воздействий 266
Звездой соединение 93, 97, 98
Звуковое давление 31
Зеебека эффект 45
Зиверт 32
Зонная плавка 401
— теория 39

И

Иерархические экспериментальные комплексы 167
Изделие 292
Изделий с применением электромонтажа чертежи 300
Издержки 250
Излучение фотонов 72
— электромагнитное 101
Излучения постоянные 37
Измерения 177
Измерительные механизмы 190
Измерительный тракт 157
Изображения операторные 111
Изоморфные графы 83
Изопермы 443, 457
Импульсов обозначения 330
Индикаторных приборов обозначения 311, 323
Индуктивности единицы 34
— расчет 147
Индуктивность 38, 76 145
Индуктивный элемент 76
Индукции магнитной единицы 34, 35
— — измерение 207
— электрической единицы 33
Индукционные методы магнитных измерений 207, 210
Индукция магнитная 38, 134, 143
— — насыщения 440
— электромагнитная 145
Интенсивность восстановления 278
— отказов 278, 279
Интерфейсы 172
Интроскопы 467
Информационное обеспечение САПР 236
Ионизаторы воздуха 364
Ионизации потенциалы 60
Ионизация 60
Ионизирующих излучений единицы 32
Ионная поляризация 67
Искажений коэффициент 101
Искровой разряд 64

Исполнения электрического оборудования 268
Истинное значение величины 177
Истоки графа 95
— поля 145
Источники тока 80, 81, 82, 89, 92
— — и ЭДС зависимые (управляемые) 89
— ЭДС 80 81, 82, 89, 92
Источников света обозначения 321
Итерационные методы решения 131

К

Кабель коаксиальный 140, 149
Кабельная бумага 388
Калория 29, 30
Кальмаллои 443, 458
КАМАК 172
Кандела 31
Канделы определение 25
Канифоль 394
Капиллярные дефектоскопы 467
Капиллярный контроль 475
Капитальные вложения 342
Капрон 385
Карбонильное железо 453
Карсона преобразование 111
Картоны электроизоляционные 389
Каскадное соединение четырехполюсников 122
Касторовое масло 384
Категории размещения оборудования 288
Катушек индуктивности обозначение 315
Катушки индуктивности 147
— — с магнитопроводом 137
Квадратный метр 26
Квантовая электроника 72
Кельвин 30
Кельвина определение 25
Керра эффект 47
Кикоина — Носкова эффект 48
Киloамперметры 202
Киловаттметры 202, 203
Киловольтметры 202
Килограмм 26
Килограмма определение 25
Килограмм-сила 29
Кирхгофа законы 83, 85, 102
— — для магнитной цепи 133
Классификация магнитных материалов 442
Классический метод расчета переходных процессов 102
Классы нагревостойкости 381
— точности 180
Клаузиуса — Мосоти уравнение 66
Климатические воздействия 268, 273
Кодирование электротехнической продукции 274
Количества вещества единицы 25
— электричества единицы 33
Коллекторные материалы 437
Комбинированные цифровые приборы 199
Коммутации законы 103
Компаунды 393
Компенсации принцип 93
Комплекс и комплект 292
Комплексная мощность 82
— проводимость 38, 77
Комплексное магнитное сопротивление 136
— сопротивление 77
Комплексные величины 37, 76
Комплексы экспериментальные 152
Компонентные уравнения 129
Конденсаторная бумага 388
Конденсаторов обозначения 311, 316
Конденсаторы 143, 146
— требования безопасности 360
Константан 423, 425, 439
Конструкторской документации оформление 292
Контактная разность потенциалов 410
Контактные материалы 432
— явления 42
Контактных соединений обозначения 331
Контроль качества 464
Контур графа 83
Контурные уравнения 130
Контурных токов метод расчета 86, 109
Концентрация носителей заряда 41
Координаты декартовы, цилиндрические и сферические 140
Корбино диск 208
Кордиерит 400
Коронный разряд 64
Коррозионная активность атмосферы 269
Коттона — Мутона эффект 47
Коэрцитивная сила 50, 440
Коэрцитиметры 215
Коэффициент затухания 38
Коэффициент мощности 82, 102
— ослабления 38, 123
— приведения по фактору времени 342
— связи 38, 145
— фазы 38, 123
— электрификации 9, 14
— эффективности капитальных вложений 342
Коэффициента трансформации обозначение 38
Коэффициенты несинусоидальности 101
— унификации 262
Кремний 41, 403
Кремнийорганическая жидкость 384
Кремнийорганические компаунды 394
— смолы 387
Крепированная бумага 384
Кривые намагничивания 134, 439
— размагничивания 136, 440
Криопроводниковые материалы 430
Кристалл-фотоэффект 48
Критические температура и магнитная индукция сверхпроводников 51
Критерии подобия 220
— согласия 185
Кубический метр 26
Кулон 33
Кулона закон 139
Куперовские пары 52, 55
Кюри точка 45, 68

Л

Лавсан 385
Лазеры 73
Лакоткани электроизоляционные 396
Лапласа преобразование 111
— уравнения 142
— функция 185
Латуни 412, 439
Ленгмюра зонды 66
Ленца закон 145
Линейные напряжения и токи 97
— соотношения 94
— цепи 75
Линии 123
— на чертежах и схемах 295
Линий воздушных емкости, индуктивности и взаимные индуктивности 147
— электрических, проводов и кабелей обозначения 330
Линия двухпроводная 140
Логарифмическая амплитудно-фазовая характеристика 94
Логометры 204
Лоренца сила 143
Лошмидта число 37
Люкс 31
Люмен 31
Люминесценция 48

М

Магистраль МЭП 172
Магнетон ядерный 35 37
Магнитная восприимчивость 38, 144
— вязкость 50
— постоянная 35, 143
— проницаемость 38, 51, 140, 440
Магнитное давление 56
— поле 143
Магнитно-мягкие материалы 441, 442
Магнитно-твердые материалы 443, 451
Магнитные дефектоскопы 465
— измерения 207
— материалы 439
— моменты электрона, протона и мюона 37
— приборы для испытания физико-механических свойств 471
— толщиномеры 469
— цепи 133
Магнитный контроль 475
Магнитных величин единицы 34
— — измерение 207
— материалов испытание 210, 214
Магнитогидродинамические уравнения 55
Магнитографические дефектоскопы 467
Магнитодвижущая сила (МДС) 134
Магнитодвижущей силы единицы 34, 35
Магнитодиодный эффект 47
Магнитодиэлектрики 443 453
Магнитометры 213
Магнитомодуляционные преобразователь 209
Магнитооптические явления 47
Магнитопорошковые дефектоскопы 467
Магнитопорошковый контроль 475

Магнитопроводов обозначения 315
Магниторезистивный эффект 46, 208
Магнитострикционные материалы 459
Магнитострикция 209
Максвелл 34, 35
Максвелла — Больцмана распределение 40
Максвелла закон 61
— уравнения 145, 146
Манганин 423, 439
Марковский метод расчета надежности 287
Масло трансформаторное и конденсаторное 384
Масса атома водорода 37
— нейтрона 35
— протона 35
— электрона 35
Массы единицы 25, 26, 27, 28
Масштабы на чертежах 297
Математическое ожидание 185
— подобие 220
Материалов обозначения 298
Матрицы контуров 86
— сечений 86
— соединений 86
Матричная форма записи уравнений 86
Махового момента единицы 27
Машин электрических обозначения 312
— — степени защиты 266
МГД-генераторы 57
Мгновенное значение 37, 75
Медь 410, 435, 439
Мейснера эффект 52
Меры 179
Металлокерамические композиции 434
— магниты 460
Методическое обеспечение САПР 236
Методы измерений 178
— расчета цепей 85
Метр 26
Метра определение 25
Метрологический надзор 176
Метрологическое обеспечение 174
Метрология 177
Механизмы измерительные 190
Механические воздействия 271
Механических величин единицы 25
Миграционная поляризация 68
Микалекс 398
Микалента 398
Миканиты 398
Микафолий 398
Микроамперметры и микровольтметры 202 203
Милливольтметры 202, 203
Мнимая часть комплексной величины 37, 76
Многокритериальная оптимизация 248
Модели 220, 229
— системы 163
— цепей 241
Моделирование 219, 220
— поля 143
Модуль 37
Моля определение 25
Момента диполя электрического единицы 33
— инерции единицы 26, 27
— магнитного единицы 34
— силы единицы 26
Моменты магнитные 37
Мосты измерительные 191, 197
Мощности единицы 26, 27
— измерение 194
— полной единицы 33
— реактивной единицы 33
Мощность электрической цепи 38, 82, 101
— электростанций 8, 11
Мультипликативные погрешности 180
Мэзона формула 96

Н

Нагревостойкость электроизоляционных материалов 381
Нагрузка согласованная 118
Надежность электротехнических изделий 276
Надписи на чертежах 295
Накопители магнитные 237
Наложения метод 93
Намагниченность 38 49, 144
Намагничивание 49
Намотанные изделия 397
Напряжение 38, 94
— холостого хода 81
Напряжения единицы 33
— номинальные стандартные 263
— электроприемников рекомендуемые 358
Напряженности магнитного поля единицы 35
— электрического поля единицы 33
Напряженность магнитного поля 38, 144
— электрического поля 38, 139
Наработка до отказа 277, 278
Насосы электромагнитные 56
Натурное моделирование 229
Начальные условия 103
Нейзильбер 423, 425, 439
Нейтрализаторы 364
Нейтраль заземленная и изолированная 352, 368
Нейтральный провод 97
«Некорректные» задачи 103
Нелегированные электротехнические стали 447
Нелинейные цепи 129, 138
Непер 29
Неразрушающий контроль 464
Нернста — Эттингсхаузена эффект 46
Нернста эффект 46
Несамостоятельный разряд 62
Несимметричные четырехполюсники 114
Несинусоидальности коэффициенты 101
Несинусоидальные токи 99
Неупругие столкновения 60
Неуравновешенные мосты 193
Нечетная функция 99
Низкочастотный фильтр 120
Нихромы 427, 439
Новолачные смолы 387
Нормальный закон распределения 280
Ньютон 26
Ньютона метод 132

О

Обмоток обозначения 302, 313, 316, 330
— схемы 308
— чертежи 302
Обозначения токов, напряжений и ЭДС на схемах 94
Оборудования электротехнического общие вопросы 260
Обработка измерений 186
— результатов экспериментальных исследований 228
Объема единицы 26, 27, 28
Однородные линии 123
Октава 26
Ом 33
Ома закон 77, 84, 142
Омметры 197
Операторные величины 37
— соотношения 109
Операторный метод 111
Оптимальное преобразование цепей 250
Оптимизационные расчеты 235
Оптимизация 247
— экспериментального комплекса 157
Оптические квантовые генераторы 73
— толщиномеры 469
Организационное обеспечение САПР 236
Органическое стекло 386
Оригиналы 111
Ослабления коэффициент 38, 123
— постоянная 38, 117, 120
Основные и неосновные носители заряда 41
Остаточная индукция 440
Отказ 277
Отключение защитное 365
Относительных единиц система 225
Отношение заряда электрона к его массе 35
Отражения коэффициент 124
Оценка 185
— вероятности безотказной работы 277

П

Пакеты прикладных программ 173, 253
Параллельное соединение 84
Параметрический метод испытания 211
Параметры электрических цепей 165
Паскаль 26 31
Пассивные двухполюсники 77
Паули принцип 39
Пашена кривые 63
Пельтье эффект 45
Передаточная функция 94, 114
Передача графа 96
Переменных состояния метод 109, 138
Переходные процессы 102
— — в линиях 125
— — — нелинейных цепях 138
Период 75
Периодическая система элементов 36
Пермаллои 441, 442, 451, 454
Пермендюр 441, 443, 458
Перминвары 443, 457

Петля гистерезиса 440
— перемагничивания 50
Печатающие устройства 239
Печатных плат контроль 478
— — чертежи 304
Пиннинг 53
Пирометры 469
Плазма 57, 63, 65
Планирование эксперимента 162
Планка постоянная 37
Пластмассы термопластичные 385
— термореактивные 387
Плотности единицы 26
— тока единицы 33
Плотность распределения 185
— тока 38, 142
Площади единицы 26, 27
Погрешности измерений 184 190
— средств измерения 179
Подвеска электромагнитная 57
Подвижности носителей заряда единицы 33
Подвижность ионов 61
Подобие 219
Подобия метод 93
Пожароопасных зон электрооборудование 377
Поисковая оптимизация 248
Пойнтинга вектор 146
Поле магнитное 143
— электрическое 139
— электромагнитное 145
Поливинилхлорид 386
Поликапролактам (капрон) 385
Полимерные диэлектрики 385
Полиметилметакрилат 385
Полистирол 385
Полиуретан 385
Полиформальдегид 386
Полиэтилен 385
Полиэфиры 394
Полная мощность 33, 38, 82, 101
Полного тока закон 133, 144, 145
Полные сопротивления и проводимости 38, 77
Полоса пропускания 120
Полосовой фильтр 120
Полупроводниковые материалы 401
Полупроводниковых материалов контроль 472, 473
— приборов обозначения 311, 320
Полупроводящая бумага 388
Полюса функции 111
Поляризация 66
Поляризованности единицы 33
Поляризованность 66, 140
Поляризуемость 66
Полярные и неполярные диэлектрики 67, 380
Помехи 161
Помещений классификация 358
Последовательности нулевая, прямая и обратная 98
Постоянная передачи 115
Постоянного тока цепи 75
Постоянные магниты 135, 440, 443, 459
— ослабления, фазы 37, 117, 120
Потенциал 139
Потенциала электрического единицы 33
Потенциалов магнитных разности единицы 34
Потенциальные коэффициенты 142
Потенциальный барьер 44
Потенциалы возбуждения и ионизации 60
— магнитного поля 144
— электромагнитного поля 146
Потери в магнитопроводе 137
— диэлектрические 67
— магнитные 440, 444
— на перемагничивание 51
Поток магнитный 38, 134, 143
Потока магнитного единицы 34, 35
Потокосцепление 38, 145
Потребление электроэнергии 8, 15
Пояснительная записка 293
Пределов измерения расширение 190
Предохранителей обозначения 317
Представление результатов 188
Прейскуранты на электротехнические изделия 344
Преобразование схемы треугольника в звезду 93
Преобразователи измерительные 157, 179
— энергии. Требования безопасности 361
Приборы измерительные 179
Прибыль 648
Приведения коэффициент 342
Приведенные затраты 342
Примесная электропроводность 41
Принужденный режим 102
Пробой диэлектриков 70
Проводимости магнитной единицы 34
— электрической единицы 33
— — удельной единицы 33
Проводимость полупроводников 401
Проводниковые материалы 409
Программное обеспечение САПР 236, 253
— — экспериментальных комплексов 173
Проектирование 234
Проект технический 294
— эскизный 293
Проницаемости диэлектрической и магнитной единицы 34
Пропиточные компаунды 393
Прямоугольная петля гистерезиса 445, 454
Прямоугольности коэффициент 446
Пуассона уравнение 142
Путь графа 83, 96

Р

Работа выхода 57
Работы единицы 26, 29
Радиана определение 25
Радиоактивности единицы 32
Радиационные дефектоскопы 467
— толщиномеры 470
Радиационный контроль 475
Радиоволновые дефектоскопы 468
Радиоволновый контроль 475
Разложения теорема 111
Размагничивания кривая 136
Размагничивающий фактор 440
Размер физической величины 177
Размеров и отклонений нанесение на чертежи 298
Разность потенциалов 37, 140
Разрешенная зона 40
Разрядников обозначения 317
Разряды в газах 62
Распределения законы 279
— коэффициент 38, 123
— функция 185, 189
Расчетные модели 230
Расширенные узловые уравнения 89, 130
Реактивная мощность 33 38, 82, 102
— проводимость 38, 77
— энергия 82
Реактивное сопротивление 38, 77
Реактивной мощности измерение 195
Реактивные составляющие напряжения и тока 77
Реги — Ледюка эффект 46
Резервирование 277, 286
Резистивный элемент 76
Резисторов обозначения 311, 317
Резольные смолы 387
Резонансы напряжения и тока 85
Рекомбинация 60
Релаксационная поляризация 68
Ремонтопригодность 277
Рентгеновские аппараты 468
Рентгеновский контроль 476
Рентгенотелевизионные установки 467
Ричардсона — Дешмана формула 57
Ротор вектора 141
Ряды тригонометрические 99

С

Самоиндукция 145
Самопроизвольная (спонтанная) поляризация 68
Самостоятельный разряд 62
Сборочная единица 292
Сварных соединений контроль 475
Сверхпроводимость 44, 51
Сверхпроводниковые материалы 430
Световых величин единицы 25, 31
Свободный ток 102
Связи графа 83
— коэффициент 38, 82
Связные графы 83
Сдвиг фаз 38, 77, 82
Себестоимость 342
Сегнетоэлектрическая точка Кюри 68
Секунда 26
Секунды определение 25
Сельсина обозначения 31
Серебро 431
Сечение графа 83
СИ (система интернациональная) 25
Силы в электростатическом поле 143
— единицы 29
— тока единицы см. Тока единицы
Сименс 33
Симметричная трехфазная система 98
Симметричные составляющие 98
— четырехполюсники 118
Синхронных машин обозначения 314
Синтез алгоритма эксперимента 160
Систематические погрешности 184, 187

Системы автоматического проектирования (САПР) 235
— единиц 25
— измерительные 179
Скалярный потенциал 144 146
Скользящие контакты 437
Скорости единицы 26, 29
Скорость волны фазовая 124
— угловая 26
Слоистые пластмассы 390
Случайные погрешности 184
Слюдиниты 399
Слюдопласт, слюдопластофолий, слюдопластолента 400
Слюдяные электроизоляционные изделия 398
Смещение электрическое 35, 140
Смещения электрического единицы 33
Собственная электропроводность 41
Совершенствование хозяйственного механизма 22
Совол и совтол 384
Согласованная нагрузка 118
Соленоида индуктивность 148
Сопоставимость вариантов 341
Сопротивление 38, 76
— проводника 146
Сопротивлений расчет 147
Сопротивления магнитного единицы 34
— электрического единицы 33
— — удельного единицы 33, 35
Составляющие симметричные 98
Сохраняемость 277
Спектральная плотность 114
Спектральный состав периодической функции 99
Спектр непрерывный 114
Сплавы высокого электрического сопротивления 423, 439
— ЮНД и ЮНДК 441, 443, 459
Средняя длина свободного пробега 60
Среднее значение переменной величины 75, 101
Средства измерений 178
— — магнитных величин 211
Сталь низкоуглеродистая 441 446
Сталь электротехническая 441, 448
Стандартизация 260
Стандартов безопасности труда система 359
Стандарты ЕСКД 638
Статического электричества воздействие 363
Стеатит 400
Стекломикалента, стекломиканит 398
Стеклослюдинит, стеклослюдинитовая лента 399
Стеклослюдопластовая лента 400
Стеклотекстолит 391, 392
Стеклотекстолитовые намотанные изделия 397
«Степени 3/2» закон 59
Стерадиана определение 25
Стефана — Больцмана постоянная 37
Стимулирование повышения эффективности 352
Стоки графа 95
Столетова закон 58
Столкновения электронов с атомами 60
Стоячие волны 125
Стриммер 64
Стробоскопический способ измерения 211
Структуроскопы 471
Схемы 293, 304
— замещения 77
— — П- и Т-образные 117
— операторные 112
— электрических цепей 83
Счетчики 196

Т

Таундсенда условие
Твердотельные лазеры 73
Текстовые документы 293
Текстолит 390, 391, 392
Текстолитовые намотанные изделия 397
Текстурометры 475
Телефонная бумага 388
Темный разряд 62
Температура электронного газа 61
Температурный индекс 383
— коэффициент сопротивления 44
— потенциал 40
Температуропроводности единицы 30
Температуры единицы 25, 30
Теоремы подобия 219, 220
Теоретические основы электротехники 74
Тепловизоры 469, 476
Тепловой контроль 469
— пробой 71
Тепловых величин единицы 30
Терминов стандартизация 275
Термогальванический эффект 45, 46
Термозависимые магнитные материалы 443, 458
Термоиндикаторы 469
Термомагнитный эффект 46
Термопластичные пластмассы 385
Термореактивные пластмассы 387
Терморезистивный эффект 44
Терморезисторы 44
Термо-ЭДС 45, 410
Термоэлектродный эффект 45
Термоэлектронная эмиссия 57
Термоэлементы 45
Тесла 34
Тесламетры 212
Технические условия 293
Технический проект 294
Техническое обеспечение САПР 236
— предложение 293
Течеискатели 467, 475
Тикональ 459
Тиристоров обозначения 311, 321
Тлеющий разряд 63
Ток 38, 142
— абсорбции 68
— проводимости 145
— смещения 145
— электрический в вакууме 59
Тока единицы 25, 33
Токи номинальные 265
Токосъемников обозначения 316
Толщиномеры 469, 476
Томсона эффект 45
Топографические векторные диаграммы 84
Топологические методы расчета 91
— свойства схем 83
— уравнения 129
Тороида индуктивность 149
Точность измерения 177
— моделирования 232
Транспортированная матрица 87
Трансформатор идеальный 118
Трансформаторов обозначения 311, 315
Трансформаторы напряжения и тока 191
— Требования безопасности 359
Трансформация спектра 159
Треугольник напряжений 77
— проводимостей 80
— сопротивлений 77
Треугольником соединение 93, 97, 98 102
Трехфазные линии 148
— цепи 96, 102
Триггера обозначение 327
Тригонометрический ряд 99
Тропическое исполнение 273

У

Угла единицы 25, 27
Угловая частота 38, 75
Угол потерь 38, 67
Ударные механические нагрузки 272
Удельная электрическая проводимость 41
Удельное сопротивление 409
Узловая матрица 86
Узловые уравнения 130
— — расширенные 87
Узловых потенциалов метод 87
Узлы графа 83
Ультразвуковые дефектоскопы 464, 479
Ультрафарфор 400
Умова — Пойнтинга теорема 146
Универсальные приборы 198
Унификация 261
Управление энергосистемами 13
Уравновешенные мосты 192
Усиление квантовое 72
Усилителей обозначения 336
Ускорение нормальное 35
Ускорения единицы 26, 29
Усреднение воздействия 158
Установившийся режим 102
Установки для магнитных измерений 216
Устойчивости цепей расчет 243

Ф

Фаза 75
Фазные напряжения, ЭДС, токи, сопротивления 97
Фазовая скорость волны 124
Фазовый резонанс 85
Фазометры 204
Фазо-частотная характеристика 114
Фазы коэффициент 38, 123
— постоянная 38, 117, 120
Фарад 33

Фарадея число 37
— эффект 47
Ферми уровень (потенциал) 40
Феррримагнетики 452
Ферриты 45, 443, 444, 452, 456, 457 460
Феррозондовые преобразователи 209
— тесламетры 213
Ферромагнетики 49
Ферромагнитный резонанс 208
— эффект Холла 46
Феррометрические измерения 210, 215, 217
Фехраль 430
Фибра 389
Физические постоянные 35
Физическое подобие 220
Фильтрующие цепи 159
Фильтры 121
Флюоресценция 49
Фонды стимулирования 352
Фононы 52
Форматы чертежей 295
Формы коэффициент 101
Фосфоресценция 49
Фотогальванический эффект 48
Фотокатоды 58
Фотомагнитоэлектрический эффект 48
Фотоны 72
Фоторезистивный эффект 48
Фото-ЭДС 48
Фотоэлектронная эмиссия 58
Фотоэффект 48
Френкеля формула 70
Фторопласты 385
Функционально-стоимостный анализ 354
Фурье интегральная формула 114
— преобразование 114
— ряды 99

Х

Характеристическое сопротивление 38, 123, 129
— уравнение 102, 103, 109
Хевисайда формулы 112
— функция 112
Химических источников тока обозначения 328
Холла разность потенциалов 402
— эффект 46, 208
Холодостойкое исполнение 273
Холостого хода напряжение 81
Хромоалюминиевые сплавы 427
Хромоникелевые сплавы 427

Ц

Центробежные (линейные) нагрузки 272
Центры метрологической службы 175
Цены на изделия 347
Цепей электрических теория подобия 225
— с распределенными постоянными теория подобия 226
Цепи постоянного и переменного тока 75
— с распределенными постоянными 123
Цепные схемы 122
Циклотронный эффект 48
Цифровой техники обозначения 324
— — схемы 309
Цифровые модели 231
— мосты и омметры 197
— приборы 197

Ч

Частичные емкости 143
Частота 75
— угловая 75
Частотная селекция 159
Частотных характеристик расчет 242
Частотомеры 204
Частоты вращения единицы 26, 29
— единицы 26
— измерение 206
— номинальные 264
Чебышева неравенство 186
Чертежей виды 293
Чертежи 295
— электротехнических изделий 299
Чертежные автоматы 239
Четная функция 99
Четырехполюсники 115
Чохральского метод 401
Чувствительности цепей расчет 243

Ш

Шрифты чертежные 297
Шоттки диоды 43
Шунты 191

Щ

Щетки для электрических машин 438
Щитовые приборы 199, 200

Э

ЭВМ 166, 234
— серий ЕС и СМ 237
ЭДС единицы 33
— самоиндукции и взаимной индукции 145
Эйлера — Фурье ряд 99
Эйнштейна закон 58
Эквивалентные синусоиды 102
Эквипотенциаль 140
Экономическая эффективность 340
Экономический эксперимент крупномасштабный 23
Экономия материальных и трудовых ресурсов 19
— энергии 14
Эксперимента организация 228
Эксперименты в электротехнике 151
Экспертных оценок метод 157
Эксплуатационные затраты 346
Экспоненциальный закон распределения 279
Электрификация 7, 8, 14
Электрическая постоянная 35, 139
— прочность 70
Электрические дефектоскопы 469
— емкостные приборы 469
— машины. Требования безопасности 359
Электрических аппаратов степени защиты 267
— величин единицы 33
— — измерение 190
— машин обозначения 312
— — степени защиты 266
— — теория подобия 226
— — чертежи 302
— полей расчеты 145, 146
— процессов измерение 165
Электробезопасность 357
Электровооруженность труда 9, 14
Электродинамические модели 229
— силы 144
Электрозащитные средства 377
Электроемкость народного дохода и продукции 14
— производства 14
Электроизмерительных приборов обозначения 319
Электроизоляционные материалы 380
Электроизоляционных материалов контроль 472, 474
Электроискровые дефектоскопы 469
Электрокерамические материалы 400
Электромагнитная индукция 145
Электромагнитное поле 145
Электромагнитной индукции закон 145
Электромагнитные насосы 56
Электромагнитных полей воздействие на человека 362
— — теория подобия 226
Электромеханических устройств модели 245
Электрон-вольт 27
Электронная поляризация 66
— электропроводность 41
Электронный парамагнитный резонанс 208
Электронно-дырочные переходы 43
Электропечей обозначения 329
Электропомещения 358
Электропотребление 15, 18
Электропроводность диэлектриков 68
— полупроводников 41
Электроснабжения автоматизированное проектирование 255
Электротермический эффект 45
Электротермических устройств и установок обозначения 328
Электротехническая промышленность 9, 18
— сталь 441
Электроустановок классификация 357
Электрофарфор 450
Электрофизика 39
Электрофорез 69
Электроэнергии производство 8, 11
Элементы цепи 76
Эмиссия электронная 56
Энергетические зоны 39
Энергии единицы 27, 29, 35
— электрической измерение 196
Энергия магнитного поля 144

Энергия цепи 82
— электростатического поля 143
Энергосистемы 8, 13
Эпоксидные смолы 394
Эрг 29, 35
Эрстед 35
Эттингсхаузена эффект 46
Эффективность экономическая 340

Ю

ЮНД и ЮНДК сплавы 441, 443, 459

Я

Ядерный магнитный резонанс 208, 219
Языки алгоритмические 173
— машинные 168

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК, Т.1

Редактор *И. В. Антик*
Художественный редактор *В. А. Гозак-Хозак*
Технический редактор *Н. П. Собакина*
Корректор *И. А. Володяева*

ИБ № 1074

Сдано в набор 19.11.84. Подписано в печать 26.03.85. Т-08813. Формат 70×108¹/₁₆. Бумага кн.-журн. имп. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 42,7. Усл. кр.-отт. 42,7. Уч.-изд. л. 63,99. Тираж 90 000 экз. Заказ 38. Цена 3 р. 70 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