

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

**УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА**

Под редакцией П. А. Курбатова

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом
высшего образования в качестве учебника для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим
направлениям и специальностям*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2019

УДК 621.3(075.8)

ББК 31.264я73

Э45

Ответственный редактор:

Курбатов Павел Александрович — доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой электрических и электронных аппаратов Национального исследовательского университета «МЭИ».

Рецензенты:

Павленко А. В. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических и электронных аппаратов Южно-Российского государственного политехнического университета (Новочеркасского политехнического института) имени М. И. Платова;

Свинцов Г. П. — доктор технических наук, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов Чувашского государственного университета имени И. Н. Ульянова.

Э45

Электрические и электронные аппараты : учебник и практикум для академического бакалавриата / под ред. П. А. Курбатова. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 440 с. — Серия : Бакалавр. Академический курс.

ISBN 978-5-534-00953-8

В книге рассмотрены основные сведения об электромеханических и силовых электронных аппаратах для электрических сетей низкого и высокого напряжения. Описаны принципы их действия, приведены их основные характеристики и области применения. Представлены электромагнитные и тепловые явления, коммутационные процессы в электромеханических аппаратах. Проанализированы типы и принципы функционирования силовых электронных коммутационных аппаратов и регуляторов постоянного и переменного тока. Изложены особенности применения систем управления электронными аппаратами и их принципы построения.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов образовательных учреждений высшего профессионального образования, обучающихся по программе подготовки бакалавров по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Учебник будет полезен специалистам в областях электротехники и электроэнергетики, связанных с применением и эксплуатацией электрических аппаратов.

УДК 621.3(075.8)

ББК 31.264я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-534-00953-8

© Коллектив авторов, 2016

© ООО «Издательство Юрайт», 2019

Оглавление

Авторский коллектив	7
Список сокращений.....	8
Предисловие	10

Раздел I

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Глава 1. Электрический аппарат как средство управления режимами работы, защиты и регулирования параметров системы	15
1.1. Функциональное назначение и классификация электрических аппаратов ...	15
1.2. Примеры применения электрических аппаратов в сетях высокого и низкого напряжения	19
Выводы	22
Вопросы и задания для самоконтроля.....	22
Рекомендуемая литература	23
Глава 2. Электромеханические аппараты систем распределения электрической энергии при низком напряжении	24
2.1. Предохранители. Устройство и принцип действия предохранителей	24
2.2. Выключатели низкого напряжения. Выключатели нагрузки низкого напряжения.....	28
2.3. Автоматические выключатели. Устройство и параметры. Назначение и основные элементы автоматического выключателя	30
2.4. Виды автоматических выключателей.....	40
2.5. Автоматические аппараты, управляемые дифференциальным током. Функциональное назначение	43
2.6. Практические задачи	51
Выводы	54
Вопросы и задания для самоконтроля.....	54
Рекомендуемая литература	56
Глава 3. Электромеханические аппараты управления.....	57
3.1. Классификация и основные технические параметры аппаратов управления.....	57
3.2. Контактторы и магнитные пускатели. Устройство и принцип действия	65
3.3. Тепловые реле. Устройство и принцип действия теплового реле.....	75
3.4. Электромагнитные реле. Устройство и принцип действия реле	81
3.5. Практические задачи	86
Выводы	91

<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	91
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	92
<i>Рекомендуемая литература</i>	92
Глава 4. Тепловые процессы в электрических аппаратах	94
4.1. Источники теплоты в электрических аппаратах и способы теплопередачи.....	94
4.2. Уравнение Ньютона – Рихмана. Уравнение теплообмена с окружающим пространством.....	95
4.3. Стационарный режим нагрева. Уравнение теплового баланса и условие стационарности	96
4.4. Переходный процесс нагрева. Дифференциальное уравнение переходного процесса.....	99
4.5. Нагрев при коротком замыкании. Кривые адиабатического нагрева	103
4.6. Нагрев в повторно-кратковременном режиме. Условия существования и классы повторно-кратковременного режима.....	106
Выводы.....	109
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	109
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	110
<i>Рекомендуемая литература</i>	111
Глава 5. Электрические контакты	112
5.1. Понятие электрического контакта.....	112
5.2. Сопротивление электрического контакта. Понятие переходного сопротивления контакта	114
5.3. Влияние контактов на нагрев проводников	119
5.4. Сваривание контактов. Температура площадки касания электрических контактов.....	122
5.5. Контактные материалы.....	127
5.6. Практические задачи.....	129
Выводы.....	130
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	131
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	131
<i>Рекомендуемая литература</i>	132
Глава 6. Электродинамические усилия в электрических аппаратах	133
6.1. Понятие о силах взаимодействия проводников	133
6.2. Электродинамические силы при переменном токе	137
6.3. Электродинамическая стойкость	138
6.4. Практические задачи оценки электродинамической стойкости.....	139
Выводы.....	142
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	142
<i>Рекомендуемая литература</i>	143
Глава 7. Электромагниты.....	144
7.1. Электромагнитные приводы электрических аппаратов	144
7.2. Электромагниты в электромеханической системе электрического аппарата.....	159
7.3. Электромагниты постоянного тока.....	167

7.4. Электромагниты переменного тока.....	183
7.5. Катушки электромагнитов	191
Выводы.....	194
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	195
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	196
<i>Рекомендуемая литература</i>	197
Глава 8. Электрическая дуга и процесс коммутации	198
8.1. Особенности процессов коммутации электрических цепей.....	198
8.2. Электрическая дуга, процесс горения и гашения. Плазма электрической дуги и процессы в ней	200
8.3. Способы гашения электрической дуги	215
8.4. Практические задачи.....	220
Выводы.....	222
<i>Задача для самостоятельного решения</i>	223
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	223
<i>Рекомендуемая литература</i>	224
Глава 9. Электрические аппараты высокого напряжения	225
9.1. Классификация электрических аппаратов высокого напряжения	225
9.2. Коммутационные аппараты высокого напряжения	228
9.3. Ограничивающие аппараты	238
9.4. Измерительные трансформаторы. Трансформаторы тока.....	243
Выводы.....	250
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	250
<i>Рекомендуемая литература</i>	251

Раздел II ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Глава 10. Силовые электронные ключи	255
10.1. Основные виды и классификация ключей	255
10.2. Принцип действия и характеристики силовых полупроводниковых приборов.....	257
10.3. Периодическая коммутация и режимы работы ключей	276
10.4. Обеспечение безопасной работы силовых электронных ключей.....	283
10.5. Практические задачи.....	287
Выводы.....	304
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	304
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	305
<i>Рекомендуемая литература</i>	306
Глава 11. Пассивные компоненты и охладители силовых электронных приборов.....	307
11.1. Электромагнитные компоненты	308
11.2. Конденсаторы	318
11.3. Теплоотвод в силовых электронных приборах	323
11.4. Практическая задача	328
Выводы.....	329

<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	329
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	330
<i>Рекомендуемая литература</i>	330
Глава 12. Системы управления электронных аппаратов	332
12.1. Общие сведения и принципы управления	332
12.2. Интегральные микросхемы и формирователи импульсов управления....	342
12.3. Датчики тока и напряжения	348
12.4. Микропроцессорные системы управления	352
Выводы.....	355
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	356
<i>Рекомендуемая литература</i>	356
Глава 13. Электронные коммутационные аппараты и регуляторы постоянного тока	357
13.1. Коммутационные аппараты постоянного тока	357
13.2. Регуляторы постоянного тока.....	377
13.3. Практические задачи.....	395
Выводы.....	399
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	399
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	400
<i>Рекомендуемая литература</i>	401
Глава 14. Электронные коммутационные аппараты и регуляторы переменного тока	402
14.1. Электронные и гибридные коммутационные аппараты.....	403
14.2. Регуляторы переменного тока с импульсной модуляцией.....	417
Выводы.....	427
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	427
<i>Рекомендуемая литература</i>	428
Глава 15. Электромагнитные управляемые аппараты	429
15.1. Общие сведения об электромагнитных статических аппаратах.....	429
15.2. Дроссели насыщения	430
15.3. Управляемые реакторы для электроэнергетики	435
Выводы.....	438
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	439
<i>Рекомендуемая литература</i>	439
Предметный указатель	440

Авторский коллектив

Курбатов Павел Александрович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой электрических и электронных аппаратов Национального исследовательского университета «МЭИ» — гл. 7;

Акимов Евгений Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Национального исследовательского университета «МЭИ» — гл. 3, 8, 9;

Годжелло Андрей Григорьевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов Национального исследовательского университета «МЭИ» — гл. 2 (кроме параграфа 2.5), 4–6;

Лепанов Михаил Геннадьевич, ассистент кафедры электрических и электронных аппаратов Национального исследовательского университета «МЭИ» — гл. 10 (совместно с Ю. К. Розановым), параграф 11.4, параграф 12.4 (совместно с Ю. К. Розановым), параграф 13.3;

Райнин Валерий Ефимович, доктор технических наук, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов Национального исследовательского университета «МЭИ» — гл. 1, параграф 2.5, гл. 13 (кроме параграфа 13.3), 14, 15;

Розанов Юрий Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов Национального исследовательского университета «МЭИ» — предисловие, гл. 10 (совместно с М. Г. Лепановым), 11 (кроме параграфа 11.4), 12 (параграф 12.4 совместно с М. Г. Лепановым).

Список сокращений

- АВ** — автоматический выключатель
АВДТ — автоматический выключатель дифференциального тока
АВН — аппараты высокого напряжения
АИМ — амплитудно-импульсная модуляция
АЛУ — арифметико-логическое устройство
АПВ — автоматическое повторное включение
АФ — активный фильтр
БКТП — блочная комплектная трансформаторная подстанция
ВАХ — вольт-амперная характеристика
ВДК — вакуумная дугогасительная камера
ВДТ — выключатель дифференциального тока
ГПН — генератор пилообразного напряжения
ГРУ — элегазовое газораспределительное устройство
ГФ — гибридный фильтр
ДКР — динамическая кривая намагничивания
ДМУ — дроссельный магнитный усилитель
ДН — дроссель насыщения
ДПГ — динамическая петля гистерезиса
ДТ — датчик тока
ДУ — дугогасительное устройство
ИМС — интегральная микросхема
КЗ — короткое замыкание
КН — кривая намагничивания
КРУ — комплектное распределительное устройство
КСО — камера стационарного одностороннего обслуживания
КТП — комплектная трансформаторная подстанция
МДС — магнитодвижущая сила
МПУ — микропроцессорное устройство
НКУ — низковольтное комплектное устройство
НН — низкое напряжение
ОБР — область безопасной работы
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство
ОПН — ограничитель перенапряжения
ОРУ — открытое распределительное устройство
ОУ — операционный усилитель
ПВН — переходное восстанавливающее напряжение
ПЗУ — постоянное запоминающее устройство
ПОС — положительная обратная связь
ПУЭ — правила устройства электроустановок

РУ — распределительное устройство
РЗА — релейная защита и автоматика
СПГ — предельная статическая петля гистерезиса
СУ — система управления
ТКЕ — тиристоры с естественной коммутацией
ТКИ — тиристоры с искусственной коммутацией
ТТ — трансформатор тока
УВВ — устройство ввода-вывода
УЗО — устройство защитного отключения
УУ — устройство управления
ФИ — формирователь импульсов
ФИУ — формирователь импульсов управления
ЧИМ — частотно-импульсная модуляция
ЦФТП — цепь формирования траектории переключения
ШИМ — широтно-импульсная модуляция
ЭА — электрический аппарат
ЭДС — электродвижущая сила
ЭДУ — электродинамическое усилие

Предисловие

Электрическая энергия — универсальный вид энергии, используемый человеком в различных областях его деятельности. Для ее получения, передачи и распределения необходимо управлять потоками электроэнергии (регулировать их величину, нормируемые параметры и иные характеристики). Функции управления потоками электроэнергии, а также функции защиты систем электроснабжения и потребителей электроэнергии выполняют электротехнические устройства, называемые электрическими аппаратами.

Электрические аппараты осуществляют подключение потребителей к источникам электроэнергии или их отключение в различных режимах работы, а также защиту потребителей и электротехнических систем при разного рода авариях. Такие аппараты применяются практически во всех технических системах, связанных с использованием электроэнергии. Функции включения и отключения электрических цепей в них выполняются электромеханическими устройствами, являющимися основой этого вида аппаратов и поэтому называемыми *электромеханическими*.

С развитием электроники стали создаваться силовые электронные аппараты для управления параметрами электроэнергии и ее преобразованием. Эти аппараты стали называться *статическими* или просто *электронными*. Интенсивное развитие технологий силовой электроники привело к созданию электронных аппаратов, позволяющих существенно повысить эффективность использования электроэнергии. Эти функции были реализованы благодаря принципиально новым свойствам электронных аппаратов — появлению управляемых электронных ключей (силовых транзисторов), способных работать с высокой частотой переключения.

Ранее издававшиеся учебники с аналогичной тематикой («Электрические и электронные аппараты») были рассчитаны на студентов, получающих квалификационные звания разного уровня — бакалавра, инженера и магистра. Различие требований к подготовке и получаемым студентами знаниям вынудило авторов существенно переработать и дополнить материал учебника с целью подготовить студентов к решению задач разной категории сложности. Данный учебник рассчитан на студентов, обучающихся для получения квалификации бакалавра по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Это определило уровень и объем представляемого в нем материала. Отличительная черта издания — единообразие представления материала, включающего тематические разделы с примерами расчета, контрольные вопросы для самопроверки, выводы и выделенные вопросы практики к изучаемому разделу, поясняющие излагаемый материал. Подобный подход позволит студенту лучше усвоить материал дисциплины.

Учебник состоит из двух разделов, в которых отдельно рассматриваются электромеханические и электронные аппараты.

В первом разделе, посвященном электромеханическим аппаратам, рассмотрены основные виды электромеханических аппаратов для применения в распределительных электрических системах низкого напряжения, аппараты управления — реле, контакторы, аппараты защиты. Отдельная глава раздела посвящена электрическим аппаратам высокого напряжения. Особенностью раздела является материал, посвященный описанию электромагнитных, механических, тепловых и иных физических процессов, определяющих функционирование аппарата.

Во втором разделе рассмотрены принципы функционирования основных видов электронных аппаратов, приведен анализ протекающих в них электромагнитных процессов, определяющих принцип действия и перспективу развития при использовании электронных приборов нового поколения.

Изучение дисциплины «Электрические и электронные аппараты» способствует формированию профессиональных компетенций, характеризующих студента в рамках:

- ***научно-исследовательской деятельности***

- готовностью изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике, связанной с электрическими и электронными аппаратами;

- готовностью понимать существо задач анализа поведения электрических и электронных аппаратов в системах распределения электрической энергии;

- способностью планировать и выполнять экспериментальные исследования электрических и электронных аппаратов по заданной методике, обрабатывать результаты экспериментов;

- способностью применять методы испытаний объектов профессиональной деятельности;

- ***проектно-конструкторской деятельности***

- способностью и готовностью выполнять проектные и конструкторские разработки простых систем распределения электрической энергии низкого напряжения с использованием электрических и электронных аппаратов на основе общих принципов проектно-конструкторской деятельности, методов анализа и моделирования;

- готовностью обосновывать принятие конкретных технических решений при выборе электрических аппаратов и разработке объектов профессиональной деятельности, использующих эти аппараты;

- способностью графически отображать схемотехнические и геометрические образы изделий и объектов профессиональной деятельности, в том числе с использованием компьютерных технологий;

- ***организационно-управленческой деятельности***

- способностью и готовностью координировать деятельность членов трудового коллектива, решая конкретные задачи в кооперации с коллегами по работе;

— способностью и готовностью систематизировать и обобщать информацию по формированию, использованию и оценке стоимости основных производственных ресурсов;

— способностью анализировать технологический процесс как объект управления, готовностью обеспечивать соблюдение заданных параметров качества продукции, контролируя и обеспечивая соблюдение требований безопасности жизнедеятельности с использованием специализированных электрических аппаратов.

Раздел I
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
АППАРАТЫ



Глава 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ АППАРАТ

КАК СРЕДСТВО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ, ЗАЩИТЫ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ

После изучения материала данной главы студент должен:

знать

- основные функции электрических аппаратов; классификацию электрических аппаратов;

уметь

- переходить от однолинейного изображения электрических схем к реальному, и наоборот;

владеть

- навыками прочтения электрических схем, содержащих аппараты.

Ключевые термины: электрический аппарат; аппараты высокого напряжения; аппараты низкого напряжения; коммутационные аппараты; аппараты распределения; аппараты управления; ограничивающие аппараты; аппараты автоматического регулирования; аппараты автоматики; предохранитель; автоматический выключатель; механизм свободного расцепления; контактор; пускатель; предохранитель; трансформатор тока; реле; релейная защита и автоматика.

1.1. Функциональное назначение и классификация электрических аппаратов

Электрические аппараты широко применяются в электроэнергетике, системах электроснабжения и электропривода, электротехнологии и электрооборудовании промышленности и сельского хозяйства, на всех видах транспорта, в бытовой и медицинской технике.

Аппарат (от лат. *apparatus* — оборудование) — прибор, техническое устройство, приспособление.

Применительно к электрическим аппаратам многозначность и неопределенность термина можно конкретизировать, рассмотрев их функциональное назначение.

Под **электрическими аппаратами** понимают электротехнические устройства, выполняющие следующие функции:

- включение и отключение электрических цепей в электроустановках, предназначенных для производства, преобразования, передачи и потребления электроэнергии;

- контроль и измерение параметров электрооборудования;
- защита электроустановок в аварийных режимах, защита человека и имущества при повреждении электрооборудования;
- регулирование параметров электротехнических устройств;
- управление технологическими процессами;
- преобразование неэлектрических величин в электрические;
- создание магнитного поля с заданными параметрами и конфигурацией.

Такое разнообразие функций привело к появлению многих видов электрических аппаратов, существенно различающихся по принципу действия и конструкции, но имеющих одно назначение.

В современном контексте **электрический аппарат** — электротехническое устройство для управления потоками энергии и информации.

С учетом вышеизложенного и различий в традициях мировых электротехнических школ классификация аппаратов достаточно условна. Их разделяют, прежде всего, на две большие группы *по принципу действия*:

- **электромеханические**, содержащие подвижные элементы, в результате перемещения которых и осуществляется функционирование аппарата;
- **статические** (иногда называемые **бесконтактными**) или **силовые электронные**, не имеющие подвижных частей и функционирующие посредством изменения параметров и характеристик входящих в их состав элементов и блоков.

Электромеханические аппараты появились на начальном этапе промышленного использования электроэнергии, прошли долгий путь совершенствования конструкций, применения новых материалов и технологий, и, в силу разных причин, до сих пор доминируют, главным образом, в сегменте коммутационной аппаратуры.

Статические аппараты являются относительно новыми устройствами (силовые полупроводниковые приборы появились в середине XX в.) и обладают расширенными функциональными возможностями. Они позволяют в одном устройстве объединить аппарат управления (с неограниченным ресурсом выполнения операции «включено-выключено»), сверхбыстродействующий аппарат защиты и регулятор подводимой к нагрузке мощности. Поэтому применявшиеся прежде различные электромеханические регуляторы (например, угольный регулятор напряжения) повсеместно вытеснены статическими аппаратами. Область использования статических аппаратов постоянно расширяется. Однако для гарантированного разъединения частей электроустановки по правилам электробезопасности всегда будут применяться аппараты с механическим разрывом цепи.

Общеприняты также следующие *классификационные признаки*.

- Напряжение главной цепи аппарата:
 - аппараты высокого напряжения (свыше 1000 В);
 - аппараты низкого напряжения (до 1000 В).
- Функциональное назначение:
 - коммутационные аппараты;
 - ограничивающие аппараты;

- аппараты автоматического регулирования;
- аппараты автоматики;
- измерительные аппараты.
- Среда, используемая для гашения дуги в электромеханических аппаратах:
 - воздушные;
 - масляные;
 - элегазовые;
 - вакуумные.

Управлять потоками энергии необходимо на всех стадиях ее применения (производство, передача, преобразование и потребление.) Однако коммутационные, ограничивающие и измерительные аппараты высокого и низкого напряжения, несмотря на идентичность функционального назначения, конструктивно резко различаются. Это обусловлено не только существенно разными требованиями по электрической изоляции, но и связано с необходимостью при помощи аппаратов высокого напряжения управлять потоками энергии очень большой мощности. В этой связи и классификация аппаратов по среде, используемой для гашения дуги, более характерна для коммутационных аппаратов высокого напряжения, в то время как аппараты низкого напряжения выполняются, как правило, воздушными.

Аппараты низкого напряжения иногда классифицируют *по току*: **слаботочные** (до 10 А) и **сильноточные** (свыше 10 А).

Коммутационные аппараты применяются для формирования конфигурации распределительной электросети, защиты сети и приемников электроэнергии в аварийных режимах, разъединения сети на части для безопасного обслуживания, управления нагрузками по принципу «включено-выключено» и защиты человека от поражения электрическим током.

В свою очередь, коммутационные аппараты разделяют:

- на аппараты распределения (выключатели различных типов, переключатели, разъединители, короткозамыкатели, отделители и т.д.);
- аппараты управления (контакторы, пускатели, сильноточные реле).

Автоматические выключатели, предохранители, тепловые реле, аппараты, управляемые дифференциальным током, часто выделяют в отдельную группу — *аппараты защиты*.

Деление коммутационных аппаратов низкого напряжения на аппараты распределения и аппараты управления возникло исторически в силу разных требований, предъявляемым к этим группам аппаратов (по коммутационному ресурсу, коммутируемым и сквозным токам и т.д.) на стадиях распределения энергии и потребления. Различие в требованиях привело к принципиально разным конструкциям, общим признаком для которых остается наличие контактно-дугогасительной системы.

Аппараты распределения энергии предназначены для относительно редких оперативных коммутаций, преимущественно в распределительных сетях, и осуществляют защиту установок и сетей в аварийных режимах работы (токи короткого замыкания и перегрузки, понижение напряжения), а также защиту людей от поражения электрическим током.

Аппараты управления предназначены для частых оперативных отключений и включений нормальных токов нагрузки и нечастых отключений токов перегрузки, обычно превышающих номинальные в 5–20 раз. Для улучшения условий коммутации тока в аппаратах управления иногда применяются полупроводниковые приборы, шунтирующие механические контакты. В таких гибридных аппаратах длительное проведение тока осуществляют контакты, в то время как полупроводниковые приборы фактически обесточены. В момент коммутации при размыкании контактов ток кратковременно отводится в полупроводниковый прибор, который затем выключается, в результате чего практически устраняется дугообразование в аппарате и существенно повышается срок его службы. Такие аппараты часто называют *аппаратами с ограниченным дугообразованием*.

Ограничивающие аппараты используются для ограничения токов коротких замыканий (реакторы и дуговые электродинамические токоограничители) или как средство защиты от перенапряжений (шунтирующие реакторы, дуговые разрядники и статические ограничители перенапряжений на основе элементов с нелинейной вольт-амперной характеристикой).

Аппараты автоматического регулирования (регуляторы) в большинстве случаев являются статическими и предназначены для автоматизации производственных процессов, преобразования, накопления энергии и управления параметрами качества электроэнергии (стабилизация напряжения, повышение коэффициента мощности и т.д.) в условиях преобладания нелинейных нагрузок. Они переживают бурный период развития, особенно с появлением полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов. Помимо применения в системах промышленного и городского электроснабжения они широко используются как стабилизаторы напряжения, корректоры и регуляторы мощности, во вторичных источниках питания и в автономной энергетике. Совместно с объектом регулирования такие аппараты образуют замкнутую систему регулирования. Применение электронных устройств в системах высокого напряжения определяется достигнутым уровнем развития элементной базы силовой электроники.

Аппараты автоматики — слаботочные реле, датчики, усилители, преобразователи, контроллеры и др. — широко используются как средства автоматизации во всех областях техники. Они работают при невысоких напряжениях (до сотен вольт) и токах (до 5 А) и обычно выполняют функции контроля какого-либо электрического параметра (например, реле) и неэлектрического входного параметра (например, датчики). Когда входной (контролируемый) параметр реле достигает заданной величины, происходит срабатывание электрического реле и «выдача сигнала» на выходе. Это осуществляется размыканием или замыканием контактов (контактные или электромеханические реле) или резким изменением электрического сопротивления на выходе (бесконтактные или статические реле). В любом случае происходит скачкообразное изменение тока в оперативной цепи, в которую включен выходной элемент. Поэтому кривая зависимости выходного сигнала от входного обычно имеет «релейный» характер. В датчиках зависимость выходного сигнала от входного имеет плавный

характер: малое изменение входного сигнала вызывает пропорциональное небольшое изменение сигнала на выходе.

Электромеханические реле используются, как правило, в относительно простой электроавтоматике. В устройствах средней сложности, как более надежные и гибкие, применяются статические реле на микроэлектронной базе. В устройствах со сложным алгоритмом работы, с относительно большим количеством входов и выходов в настоящее время используются микропроцессорные программируемые контроллеры. Современная релейная защита строится также на базе микропроцессорных устройств.

В целом, необходимо отметить, что электромеханические аппараты автоматики интенсивно вытесняются статическими устройствами на микропроцессорной основе. Однако они продолжают успешно применяться в отдельных электромеханических устройствах, например аппараты с герметизированными контактами — *герконы*. Контакты геркона находятся в стеклянном герметичном баллоне с инертным газом для уменьшения воздействия на них окружающей среды. Контакт-детали выполнены в виде ферромагнитных упругих пластин, которые под воздействием внешнего магнитного поля притягиваются, что приводит к замыканию контактов. При снятии внешнего магнитного поля силы упругости возвращают контакты в исходное состояние. Благодаря такой конструкции герконы легко управляются и обладают очень высоким коммутационным ресурсом. Герконы также способны работать при малых токах (менее 20 мА) и напряжениях (5–15 В и менее), что делает их совместимыми с микропроцессорными устройствами. Поэтому герконовые реле эффективно применяются в самых разных областях техники, и многие электромеханические датчики строятся на базе герконов.

Изменение параметров магнитного или электрического поля при перемещении твердых тел, изменении уровней жидкостей или сыпучих тел лежит в основе принципа действия различных *индуктивных и емкостных датчиков* (первичных преобразователей). Такие датчики позволяют осуществлять контроль угловых и линейных перемещений деталей, давления газов и жидкостей, уровней жидких и сыпучих тел, механических усилий и моментов, скоростей движения и т.д.

Магнитоупругие датчики используют эффект изменения магнитной проницаемости ряда материалов при появлении в них механических напряжений и деформаций.

1.2. Примеры применения электрических аппаратов в сетях высокого и низкого напряжения

Электрические аппараты высокого напряжения работают в энергосистемах, представляющих собой совокупность электрических станций, трансформаторных подстанций и линий электропередачи высокого напряжения (от 6 до 1150 кВ). С ростом напряжения габариты аппаратов увеличиваются и при напряжении 500 кВ достигают высоты многоэтажного дома. В установках высокого напряжения применяются следующие аппараты:

выключатели, предохранители, разъединители, отделители, короткозамыкатели, измерительные трансформаторы тока и напряжения, реакторы и разрядники. На основе аппаратов создаются различные комплектные распределительные устройства. Функционирование энергосистемы поддерживается аппаратурой релейной защиты и автоматики.

На рис. 1.1 приведена схема включения аппаратов на электрической станции и примыкающей к ней повышающей подстанции. От генераторов G через выключатели Q напряжение подается на сборные шины. Силовой трансформатор T преобразует генераторное напряжение (20 кВ) в более высокое (220 кВ) для передачи его на дальние расстояния через линии электропередачи W , оперативные коммутации которых осуществляются выключателями. На фидерах установлены измерительные трансформаторы тока TA , а на шинах — измерительные трансформаторы напряжения TV . Предохранители FU защищают трансформаторы TV от токов коротких замыканий. Вторичные обмотки измерительных трансформаторов подключаются к **электрическим аппаратам релейной защиты и автоматики (РЗА)**. Для защиты от атмосферных и коммутационных перенапряжений на шинах подстанции установлены разрядники F . На отходящих фидерах устанавливаются реакторы LR , одно из назначений которых — ограничение токов короткого замыкания. На схеме не показаны разъединители, необходимые, прежде всего, для безопасного обслуживания элементов энергосистемы.

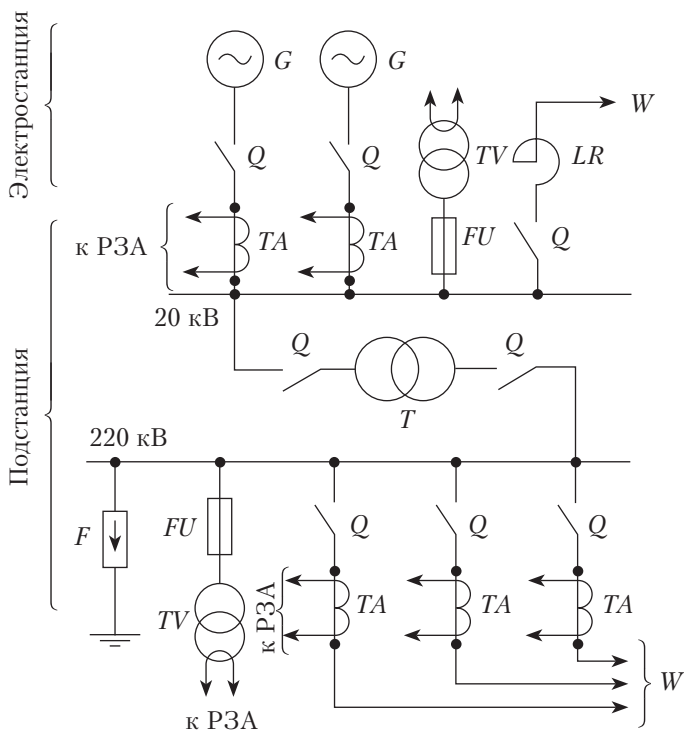


Рис. 1.1. Схема включения аппаратов на электрической станции и примыкающей к ней повышающей подстанции

Рассмотрим пример применения аппаратов низкого напряжения. На рис. 1.2 приведена схема управления асинхронным двигателем *M*. Автоматический выключатель *QF* подключает цепь управления двигателем к питающей сети, а в отключенном положении отсоединяет нижестоящий участок электроустановки от сети. Многие современные выключатели обладают функцией гарантированного разъединения. Поэтому в данном случае для безопасного обслуживания установки рубильник с видимым разрывом не требуется. Выключатель *QF* может осуществлять также защиту электроустановки при коротких замыканиях, перегрузках и недопустимом снижении напряжения. Токи короткого замыкания и перегрузки вызывают опасный нагрев оборудования, а пониженное напряжение приводит к затормаживанию двигателя и повышению тока.

Управление работой двигателя выполняется посредством электромагнитного контактора *KM*. Включение и отключение контактора происходит, соответственно, при нажатии кнопок *SB1* (ПУСК) и *SB2* (СТОП), включенных последовательно в цепь питания катушки *KM* электромагнитного привода контактора от фазного напряжения сети. При нажатии кнопки *SB1* помимо замыкания главных контактов контактора *KM* замыкаются и его вспомогательные контакты, шунтирующие кнопку *SB1*, что исключает остановку двигателя при отпускании кнопки.

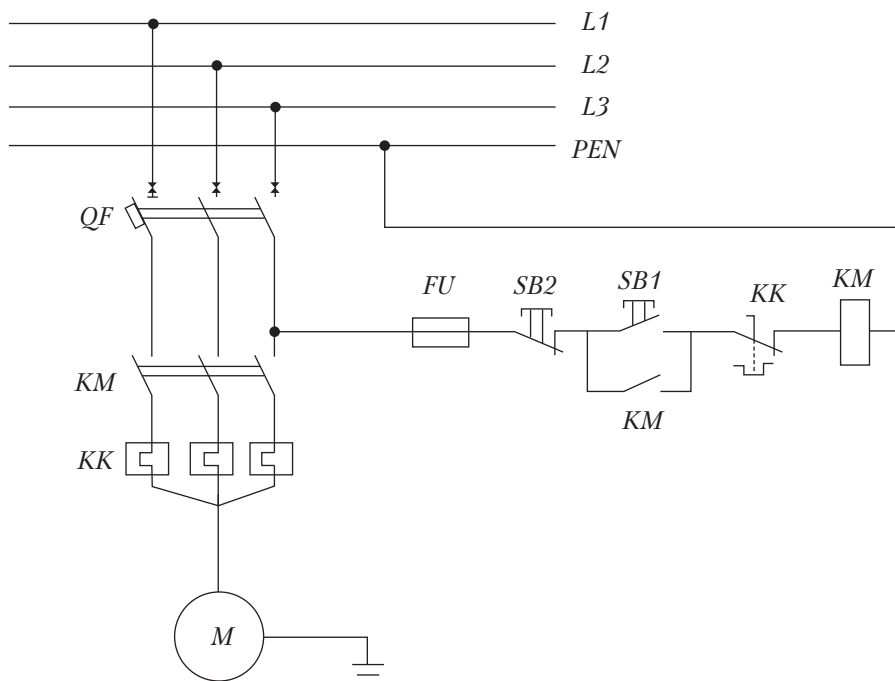


Рис. 1.2. Схема управления асинхронным двигателем

Защита двигателя от перегрузки выполняется тепловым реле *KK*. Нагревательные элементы реле включены последовательно в главную цепь контактора. При токе перегрузки происходит нагрев чувствительного элемента

теплового реле. При достижении температуры срабатывания размыкающие контакты реле *КК*, включенные в цепь катушки контактора *КМ*, размыкаются, прерывая ток в цепи катушки, и контактор отключается под действием силы отключающей пружины. Предохранитель *FU* защищает цепь катушки при коротком замыкании. Контактор совместно с тепловым реле и кнопками образуют схему *пускателя*, который может производиться как самостоятельное изделие.

Главное отличие автоматического выключателя от контактора — наличие *механизма свободного расцепления*. В работе аппарата защиты возможны два взаимоисключающих процесса: включение аппарата и одновременно его автоматическое срабатывание. Механизм свободного расцепления обеспечивает автоматическое размыкание контактов при включении аппарата на короткое замыкание, независимо от работы включающего привода. Срабатывание выключателя в аварийных режимах выполняется по команде расцепителей, в основном теплового или электромагнитного действия. В выключателях, предназначенных для защиты разветвленных распределительных сетей, применяются электронные (микропроцессорные) расцепители, обладающие повышенной чувствительностью, быстродействием и селективностью и способные интегрировать аппараты в информационные сети.

Сети низкого напряжения, в отличие от высоковольтных, имеют большие кратности токов короткого замыкания относительно рабочих значений токов. Поэтому современные аппараты защиты выполняют токоограничивающими. Для ограничения тока используется естественно возникающая при коммутации дуга, обладающая достаточно большим электрическим сопротивлением. Токоограничение при отключении больших токов (сверхтоков) достигается за счет быстрого разведения контактов, поскольку раннее появление электрической дуги на начальном участке переднего фронта тока КЗ препятствует нарастанию тока до ударного значения. Использование электродинамических сил для разведения контактов позволило довести предельную коммутационную способность автоматических выключателей до 150 кА и, благодаря токоограничению, в десятки раз уменьшить электродинамическое и термическое воздействие токов короткого замыкания на сети и электроустановки в целом.

Выводы

Приведено и обосновано современное определение электрических аппаратов. Дано их функциональное назначение. Перечислены классификационные признаки и приведена классификация электрических аппаратов. Для каждой классификационной группы указаны характерные типы аппаратов. Рассмотрены примеры применения электрических аппаратов в системах высокого и низкого напряжения.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое электрический аппарат в современном представлении?
2. Назовите функции электрических аппаратов.

3. На какие две группы подразделяют аппараты по принципу действия?
4. По каким признакам принято классифицировать электрические аппараты?
5. Как подразделяют аппараты в зависимости от номинальных напряжения и токов?
6. Какие функции выполняют коммутационные аппараты?
7. Какие аппараты относятся к аппаратам распределения?
8. Какие электрические аппараты относятся к аппаратам защиты, и каковы их функции?
9. Перечислите аппараты, относящиеся к аппаратам управления.
10. Какие аппараты относятся к ограничивающим аппаратам?
11. Какие функции выполняют аппараты автоматического регулирования?
12. Каково функциональное назначение аппаратов автоматики?
13. Какие аппараты применяются в установках высокого напряжения?
14. Воспроизведите схему управления асинхронным двигателем.
15. Укажите назначение аппаратов в схеме прямого пуска электродвигателя.

Рекомендуемая литература

1. Основы теории электрических аппаратов : учебник для вузов / под ред. И. С. Таева. — М. : Высшая школа, 1987.
2. Электрические и электронные аппараты : в 2 т. Т. 1. Электромеханические аппараты : учебник для студентов высших учебных заведений / Е. Г. Акимов [и др.] ; под ред. А. Г. Годжелло, Ю. К. Розанова. — М. : Академия, 2010.

Глава 2

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ НИЗКОМ НАПРЯЖЕНИИ

В результате изучения материала данной главы студент должен:

знать

- устройство, конструктивные элементы, принципы действия, основные параметры предохранителей, автоматических выключателей низкого напряжения (далее — НН), электромагнитных и тепловых расцепителей;
- защитные характеристики предохранителей и автоматических выключателей; возможности и функции современных автоматических выключателей с микропроцессорным управлением;
- способы обеспечения селективности;
- назначение и принцип действия устройств защитного отключения (далее — УЗО);

уметь

- выбирать автоматические выключатели и их уставки;
- обосновывать применение типовых схем подключения УЗО;
- принимать решение о выполнимости требований селективности на основе каталожных характеристик;

владеть

- профессиональной терминологией в области электроэнергетики;
 - способами решения практических задач определения длины защищаемой линии при коротких замыканиях;
 - методом построения карт селективности;
 - навыками поиска информации о характеристиках электромеханических аппаратов распределения энергии, в том числе с использованием Интернета.
-

2.1. Предохранители. Устройство и принцип действия предохранителей

Предохранитель — электромеханический аппарат, предназначенный для защиты элементов систем распределения электрической энергии и оборудования от сверхтоков: токов КЗ и токов перегрузки.

Конструкция предохранителя состоит из основания (1) с присоединительными выводами (3), **плавкой вставки**, в которой находится плавкий элемент (2). Разрез типичной конструкции плавкой вставки представлен на рис. 2.1, а. Схематичное изображение предохранителя на принципиальных схемах и его стандартное обозначение приведены на рис. 2.1, б.

Протекание сверхтока вызывает нагрев плавкого элемента и его расплавление с образованием электрической дуги. После погасания электрической дуги цепь оказывается разомкнутой. Для успешного гашения дуги и улучшения отвода теплоты плавкую вставку могут заполнять специальным наполнителем (кварцевым песком, мелом, их смесью). Плавкий элемент обычно выполняют в виде пластины калиброванной толщины. Эта пластина может иметь сужения для создания определенных зон наиболее интенсивного выделения теплоты. Именно в одной из таких зон реально и происходит расплавление плавкого элемента.

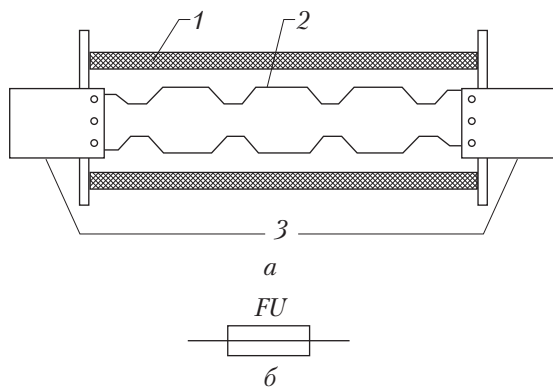


Рис. 2.1. Схема типовой конструкции предохранителя:

a — плавкая вставка; *б* — изображение предохранителя на принципиальных схемах

Процесс расплавления плавкого элемента и горения электрической дуги вплоть до ее погасания называется **срабатыванием предохранителя**. После срабатывания предохранителя для восстановления электроснабжения его плавкая вставка должна быть заменена. Для выполнения операции замены предохранителя необходимо привлечь квалифицированного оператора, так как один из присоединительных выводов на корпусе предохранителя может быть носителем высокого электрического потенциала относительно земли и представлять опасность для человека.

Время срабатывания предохранителя можно разделить на два интервала. Первый — *время плавления плавкого элемента*, второй — *время горения дуги*. Для определения эффективности предохранителя наиболее важно время плавления, так как возникающая электрическая дуга вводит в цепь сопротивление, которое ограничивает ток и таким образом способствует уменьшению вредного термического воздействия тока КЗ на все элементы системы.

Защитная характеристика предохранителя

Способность предохранителя защитить оборудование от губительного действия сверхтоков определяется его защитной характеристикой. Эта характеристика представляет зависимость времени действия предохранителя от тока, и потому ее называют **время-токовой характеристикой**. Наиболее важной является зависимость времени плавления t_f от действующего

значения ожидаемого сверхтока. Функция $t_f(I)$ существенно нелинейна и в области малых значений времени описывается уравнением

$$t_f = D_{ms} \left(\frac{S}{I} \right)^2, \quad (2.1)$$

где константа D_{ms} зависит от материала плавкого элемента; S — площадь поперечного сечения плавкого элемента; I — *ожидаемый ток*¹ при коротком замыкании.

Поскольку предохранитель может ограничивать реальный ток КЗ, его *токоограничивающую способность* характеризуют зависимостями интеграла Джоуля за время отключения $(I^2t)_{\text{откл}}$ от ожидаемого тока КЗ $I_{\text{ож}}$:

$$(I^2t)_{\text{откл}} = f(I_{\text{ож}}). \quad (2.2)$$

По определению интеграл Джоуля имеет вид

$$I^2t = \int_0^t i^2 dt \quad (2.3)$$

и численно равен тепловой энергии, выделяющейся на сопротивлении 1 Ом за время t . Таким образом, интеграл Джоуля за время отключения характеризует термическое действие тока КЗ при отключении этого тока предохранителем. Время отключения состоит из преддугового времени и времени горения дуги. Преддуговое время — это время от возникновения тока, достаточного для расплавления плавкого элемента, до возникновения дуги.

Время-токовая характеристика предохранителя в реальных условиях подвержена разбросу времени и соответствующего тока. Типичные защитные характеристики плавкой вставки представлены на рис. 2.2.

Ограничивая возможный разброс этих характеристик, с учетом российского и международного стандартов [1] для предусмотренного **условного времени** (1 или 2 ч) задают значения I_{nf} — **условного тока неплавления** и I_f — **условного тока плавления**. При условном токе неплавления плавкий элемент может расплавиться за время не меньше, чем условное. При условном токе плавления плавкий элемент должен расплавиться за время, не превосходящее условного значения.

Граничные характеристики задают с учетом значений пороговых токов и соответствующего им времени плавления, как это показано на рис. 2.2, где I_{\min} (10 с) — минимальное значение тока, при котором преддуговое время составляет не менее 10 с; I_{\max} (5 с) — максимальное значение тока, при котором время отключения составляет не более 5 с; I_{\min} (0,1 с) — минимальное значение тока, при котором преддуговое время составляет не менее 0,1 с;

¹ Ожидаемый ток цепи — ток, который проходил бы по цепи, если бы включенный в нее плавкий предохранитель был заменен проводником, полным сопротивлением которого можно пренебречь. Обычно отключающую способность и характеристики плавкого предохранителя, например $(I^2t)_{\text{откл}}$ и характеристики пропускаемого тока, задают при определенном значении ожидаемого тока.

$I_{\max}(0,1 \text{ с})$ — максимальное значение тока, при котором время отключения составляет не более 0,1 с.

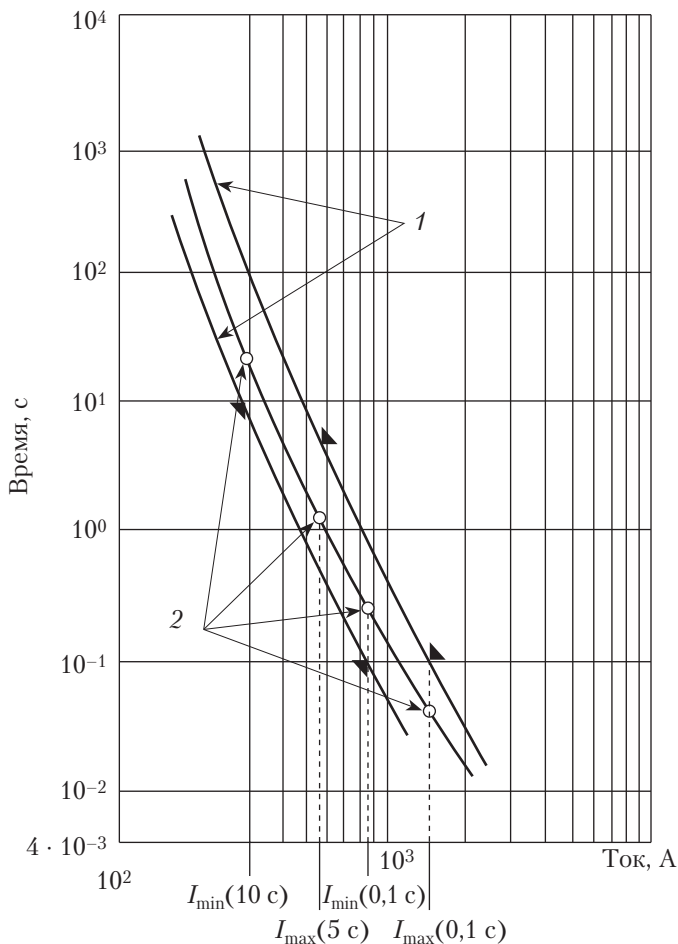


Рис. 2.2. Время-токовые характеристики:
 1 — границы зоны время-токовой характеристики;
 2 — фактические результаты испытаний

Вопросы практики

Плавкие вставки предохранителей делят на два типа. Если время-токовая характеристика задана во всем диапазоне значений тока, допустимых для предохранителя вплоть до возможных максимальных токов при отключении, то вставка принадлежит к типу, обозначаемому буквой *g*. Если время-токовая характеристика определена только при больших значениях тока, например только для значений тока больших, чем четырехкратный номинальный ток, то плавкая вставка маркируется буквой *a*. Категория плавкой вставки определяет ее возможное использование. Плавкие вставки общего назначения относят к категории, обозначаемой *G*, а вставки, используемые для защиты электродвигателей, обозначают буквой *M*. Таким образом, возможны плавкие вставки, маркированные как *gG*, *gM*, *aM* и редко встречаются *aG*.

2.2. Выключатели низкого напряжения. Выключатели нагрузки низкого напряжения

Коммутационные электрические аппараты, т.е. устройства, предназначенные для включения или отключения тока в одной или нескольких электрических цепях, являются основными аппаратами распределения электрической энергии. В таких устройствах электрическая цепь оказывается в разомкнутом или замкнутом состоянии в результате операции размыкания или замыкания контакт-деталей, перемещающихся друг по отношению к другу. Узлы, состоящие из контакт-деталей и несущих их токопроводящих элементов, предназначенных для установления непрерывности цепи при их соприкосновении и в результате их движения относительно друг друга в процессе оперирования, называют просто **электрическим контактом коммутационного аппарата**.

Функции, выполняемые коммутационным аппаратом, такие как разъединение (секционирование), управление, защита, сигнализация и др., определяют тип коммутационного аппарата.

Функция разъединения или **гарантированного отключения** подразумевает наличие обязательной индикации разомкнутого и замкнутого положений контактов аппарата и способность изоляционного промежутка и всей электрической изоляции аппарата выдерживать заданные импульсные перенапряжения. Оба эти условия обеспечивают достаточную безопасность работ на отключенной электроустановке.

Включать, проводить и отключать токи в нормальных условиях может коммутационный аппарат, называемый **выключателем**. Выключатель может быть предназначен и для работы при требуемых рабочих перегрузках. Таким образом, выключатель *управляет* потоком электрической энергии от сети к потребителю.

Управление и разъединение могут быть объединены в одном аппарате, который называется **выключатель-разъединитель** или часто просто **выключатель нагрузки**.

При коротких замыканиях в сети и выключатель нагрузки, и разъединитель (аппарат гарантированного отключения) должны проводить ток в течение установленного времени. Ток короткого замыкания, который разъединитель или выключатель может проводить в течение заданного времени, называют **наибольшим кратковременным током**. Его допустимое значение для данного аппарата обозначают $I_{свр}$. Обычно изготовители задают этот ток для времени 0,5; 1 или 3 с. В технической документации часто это допустимое значение именуют **«сквозным током КЗ»**.

Выключатели нагрузки с предохранителями

Выключатели, разъединители и выключатели-разъединители с ручным приводом могут быть конструктивно объединены с предохранителями. Такие комбинированные электрические аппараты стали широко применяться в последние десятилетия, поскольку при простоте и дешевизне обеспечивают совмещение функций разъединения, управления и защиты от токов перегрузки и короткого замыкания.

Функции, выполняемые такими комбинированными аппаратами, отображаются на схемах распределения электрической энергии так, как это показано на рис. 2.3. Предохранитель-выключатель-разъединитель (рис. 2.3, позиция 5) — это выключатель-разъединитель, у которого плавкая вставка или держатель с плавкой вставкой образуют подвижный контакт выключателя. Обычно при размыкании такого аппарата плавкая вставка становится доступной для замены. Кроме того, при этом создается видимый разрыв электрической цепи, что может требоваться для обеспечения условий безопасного обслуживания электроустановки. На позиции 4 на рис. 2.3 представлен аппарат, в котором отключение выключателя не сопровождается извлечением плавкой вставки, как это имеет место в аппарате, изображенном в позиции 5 того же рисунка.

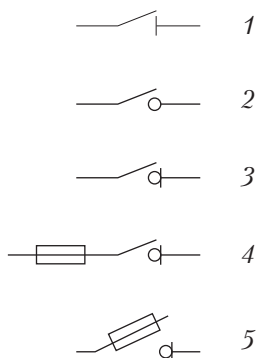


Рис. 2.3. Комбинированные выключатели с предохранителями:

- 1 — разъединитель; 2 — выключатель; 3 — выключатель-разъединитель;
4 — выключатель-разъединитель-предохранитель;
5 — предохранитель-выключатель-разъединитель

Вопросы практики

На базе более сложных автоматических выключателей (см. параграф 2.3), лишенных функции защиты, изготавливают выключатели-разъединители с реализованной возможностью дистанционного или даже автоматического управления. Такие выключатели часто называют **выключателями нагрузки**.

Широко распространенные простейшие коммутационные аппараты, называемые рубильниками, чаще всего относятся к разъединителям. Рубильник, если он снабжен дугогасительными камерами, может при определенных напряжениях выполнять функцию выключателя-разъединителя.

Разъединители, выключатели и выключатели-разъединители обычно выпускают для номинальных токов до 2500 А при напряжениях до 690 В. Выключатели-разъединители (выключатели нагрузки) на базе автоматических выключателей могут иметь номинальные токи до 6300 А.

Выключатель-разъединитель в общем случае не приспособлен для отключения токов короткого замыкания, но может быть способен включать их. В этом случае изготовитель должен задать в наборе характеристик аппарата номинальную включающую способность в условиях короткого замыкания I_{cm} (см. параграф 2.3).

2.3. Автоматические выключатели. Устройство и параметры. Назначение и основные элементы автоматического выключателя

Механический коммутационный аппарат, способный включать, проводить и отключать токи при нормальном состоянии электрической цепи, а также включать, проводить в течение заданного времени и автоматически отключать токи в аномальных состояниях электрической цепи, например при коротком замыкании (КЗ), — это **автоматический выключатель** [2].

На рис. 2.4 представлены типичные основные узлы автоматического выключателя. Главным узлом является контактно-дугогасительная система (см. рис. 2.4, элементы 10–15). Подвижные контакты выключателя перемещаются совместно со звеньями **механизма свободного расцепления** (см. рис. 2.4, элементы 8, 9). Необходимые перемещения осуществляются под действием рукоятки 7 или **отключающей пружины** 6. Автоматическое отключение при аварии или при дистанционном управлении происходит под действием элементов **блока управления и защиты** (см. рис. 2.4, элементы 1–4). На рисунке механизм аппарата показан в состоянии отключения рукояткой 7, в момент, когда электрическая дуга еще не погасла между дугогасительными контактами.

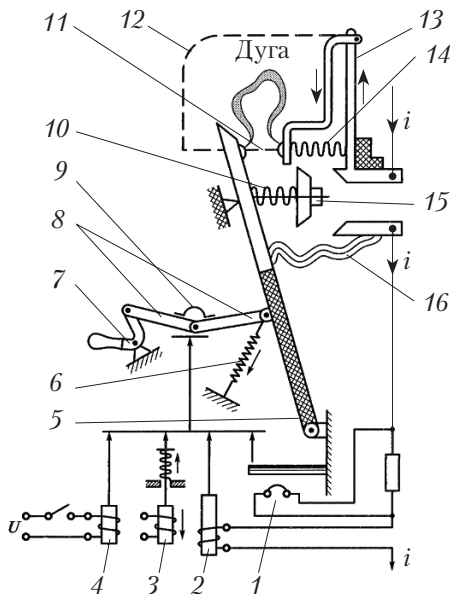


Рис. 2.4. Основные узлы и элементы автоматического выключателя:

- 1 — термобиметаллический расцепитель; 2 — электромагнитный расцепитель максимального тока; 3 — расцепитель минимального напряжения; 4 — независимый расцепитель напряжения; 5 — главный рычаг, несущий подвижный контакт; 6 — отключающая пружина; 7 — рукоятка привода выключателя; 8 — ломающиеся рычаги; 9 — пружина механизма свободного расцепления; 10 — контактная пружина главного подвижного контакта; 11 — дугогасительные контакты; 12 — дугогасительная камера; 13 — компенсатор электродинамических сил дугогасительных контактов; 14 — пружина дугогасительных контактов; 15 — главные контакты; 16 — гибкая токопроводящая связь

Для ручного включения поворачивают рукоятку 7 вверх, до момента пока рычаг 5, несущий главный подвижный контакт 15, не встанет на защелку (не показана на рисунке). Во включенном состоянии главные контакты 15 и дугогасительные контакты 11 будут замкнуты, а отключающая пружина 6 взведена (растянута).

Первыми при включении замыкаются дугогасительные контакты 11, после них — главные контакты 15. В процессе отключения сначала расходятся главные контакты, возникает разрыв цепи главных контактов и ток переходит в дугогасительные. В результате на главных контактах предотвращается образование электрической дуги большой мощности. Дуга гасится в дугогасительной камере 12. Гибкая медная связь 16 необходима для создания цепи тока после размыкания главных контактов. Компенсация электродинамических сил отталкивания контактов (сил Двайта) реализуется компенсатором в виде параллельных проводников 13, ток в которых протекает в противоположных направлениях и потому отталкивает их друг от друга, прижимая дугогасительные контакты друг к другу вместе с их пружиной 14. (О компенсации сил в контактах см. подробнее в гл. 6.)

Расцепители блока защиты и управления

Защитные функции автоматического выключателя и дистанционное управление им обеспечивается специальными устройствами — **расцепителями** (см. рис. 2.4, элементы 1–4). В различных аварийных режимах расцепители воздействуют на **механизм свободного расцепления** (элементы 8–9).

Расцепители 1 и 2 защищают от сверхтоков (токов перегрузки и КЗ) и называются **расцепителями максимального тока**. Расцепитель с биметаллическим элементом (см. рис. 2.4, элемент 1) защищает от токов перегрузки. Время действия **теплового расцепителя** зависит от тока: чем *больше* ток, тем *быстрее* расцепитель срабатывает. Время действия электромагнитного расцепителя обычно крайне мало, и условно считается, что он срабатывает мгновенно. Подобный расцепитель защищает от действия токов короткого замыкания.

Другие виды расцепителей также показаны на рис. 2.4. Например, **минимальный расцепитель** 3 защищает от снижения напряжения контролируемой сети, в которую он включен. Такой расцепитель может быть использован для **блокировки автоматического выключателя**. Если напряжение на этом расцепителе отсутствует, то автоматический выключатель не может быть включен. **Независимый расцепитель** 4 позволяет практически мгновенно дистанционно отключить выключатель.

Механическая связь между рукояткой 7 и главным рычагом 5 осуществляется через систему ломающихся рычагов 8. Эти рычаги вместе с пружиной 9 образуют **механизм свободного расцепления**, который разрывает связь между рукояткой и подвижным контактом при автоматическом отключении аппарата, когда расцепители создают усилие, перемещающее вверх шарнир, связывающий рычаги 8.

Автоматная диаграмма состояний и переходов

Анализируя принцип работы механизма свободного расцепления, можно выделить *три* возможных *состояния* автоматического выключателя: «отключен», «включен» и «отключен автоматически». Переход из одного состояния в другое происходит при определенных событиях или воздействиях. Связь состояний и переходов наглядно отображается так называемой **автоматной диаграммой**, представленной на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Диаграмма состояний и переходов автоматического выключателя

Состояния автоматического выключателя представлены прямоугольными полями с надписями внутри. Эти надписи описывают характер состояния и дополнительные пояснения. Состояния соединены стрелками. Каждая стрелка соответствует переходу. Такие стрелки, следуя теории графов, называют дугами или ребрами **графа переходов**. Переход может состояться между состояниями. Воздействие или причина, вызвавшая переход, отображается надписью над стрелкой.

При переходе в положение «включен» взводится отключающая пружина выключателя, и он готов к отключению при аварийных режимах. Под действием перегрузки (дуга диаграммы «перегрузка») или КЗ (дуга «КЗ») происходит автоматическое отключение, т.е. переход в состояние «отключен автоматически». Теперь в состоянии «включен» аппарат не может быть переведен переводом рукоятки вверх. Это связано с тем, что в реальном автоматическом выключателе при аварии отключение сопровождалось рас-

цеплением механизма свободного расцепления. Перевод рукоятки вверх не передает усилие на главный контактный рычаг. Поэтому на диаграмме из состояния «отключен аварийно» дуга с надписью «перемещение рукоятки вверх» ведет в то же самое состояние, из которого она выходит. Переход в состояние «включен» теперь возможен только, если сначала достичь состояния «отключен». Такой переход осуществляется при переводе рукоятки вниз. В реальном механизме при таком движении механизм свободного расцепления вновь составляет жесткое звено (как на рис. 2.4) и может передать усилие от рукоятки 7 на рычаг 5.

Для однозначного визуального определения положения контактов на автоматическом выключателе обязательно предусматривается **индикация**. Включенному состоянию (замкнутому положению контактов) соответствует верхнее положение рукоятки выключателя и знак (**I**), отключенному вручную (разомкнутому) — нижнее положение и знак (**0**). Если выключатель отключен автоматически, то ручка располагается посередине между включенным и отключенным положениями.

Ограничение тока короткого замыкания автоматическими выключателями

В главных распределительных устройствах НН, питаемых непосредственно от понижающего трансформатора, ток КЗ может превосходить в 20 и более раз номинальный ток автоматического выключателя. Этот выключатель часто называют **головным**. Для выключателей, устанавливаемых на отходящих линиях, номинальные токи естественно меньше, чем на вышестоящем головном выключателе. При этом уровень токов КЗ для выключателей отходящих линий практически не отличается от токов КЗ головного аппарата. Тогда ток КЗ может достигать 100-кратных значений. Для снижения термического и электродинамического действий столь высоких значений токов применяют токоограничивающие автоматические выключатели.

Токоограничение автоматическими выключателями при КЗ создается за счет сопротивления электрической дуги, возникающей в момент размыкания контактов аппарата. Но для эффективного токоограничения размыкание контактов аппарата должно возникнуть еще до того, как ток КЗ достигнет своего амплитудного значения, т.е. уже в первом полупериоде. Такое быстрое размыкание контактов осуществляется за счет отталкивания контактов электромагнитными силами Ампера, создаваемыми при взаимодействии тока с магнитным полем близлежащих элементов токопровода в аппарате. В автоматических выключателях с номинальными токами, не превосходящими 150 А, подвижный контакт при КЗ может быть отброшен от неподвижного непосредственным ударом якоря электромагнитного расцепителя мгновенного действия по рычагу, несущему подвижный контакт.

Эффект токоограничения приводит к тому, что реальное пиковое значение тока КЗ становится много меньше ожидаемого значения. Это улучшает электродинамическую стойкость всех элементов сети и самого выключателя. Пример зависимостей ударного тока КЗ от ожидаемого действующего значения тока КЗ приведен на рис. 2.6.

Вместе с тем, и значение интеграла Джоуля за время протекания тока КЗ сокращается во много раз, так как время протекания тока становится меньше одного полупериода. Ограничение значения интеграла Джоуля за время отключения физически означает ограничение энергии, выделившейся за время КЗ в межконтактном промежутке (т.е. в электрической дуге) и во всех токоведущих элементах как сети, так и автоматического выключателя. Пример зависимостей интеграла Джоуля КЗ от ожидаемого действующего значения тока КЗ приведен на рис. 2.7.

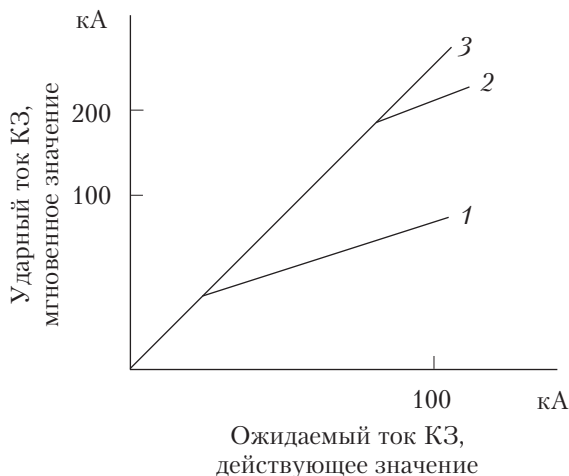


Рис. 2.6. Ограничение ударного тока КЗ автоматическими выключателями:
 1 — выключатель с номинальным током 1000 А; 2 — выключатель с номинальным током 2500 А; 3 — аппараты без токоограничения

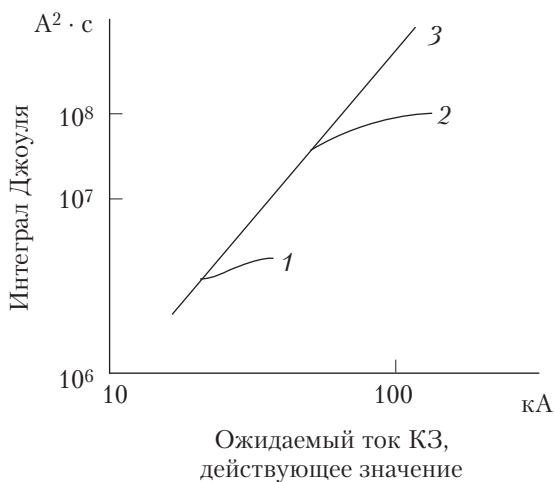


Рис. 2.7. Ограничение значения интеграла Джоуля режима КЗ автоматическими выключателями:

1 — выключатель с номинальным током 1000 А; 2 — выключатель с номинальным током 2500 А; 3 — аппараты без токоограничения

Номинальные и наибольшие параметры автоматических выключателей. Среди многочисленных возможных параметров для автоматических выключателей важнейшими являются **номинальное напряжение U_n** и **номинальный ток I_n** . Эти значения не являются обязательными в эксплуатации. Реально автоматический выключатель может использоваться и при меньших значениях напряжения. Так, выключатель с $U_n = 690$ В может эксплуатироваться в сети с рабочим напряжением 400 В. Такое напряжение называют **рабочим напряжением**. При работе в условиях повышенной окружающей температуры или при работе на большой высоте над уровнем моря выключатель не следует эксплуатировать при номинальном токе. Ток, определяемый условиями эксплуатации, называют **рабочим током**. Рабочие (или эксплуатационные) значения напряжения и тока обозначают U_e и I_e .

Способность автоматического выключателя выполнять свое назначение в условиях протекания тока КЗ характеризуют **наибольшими параметрами**. К их числу относится, в частности, **наибольший кратковременный ток $I_{св}$** . Такой ток в условиях КЗ автоматический выключатель должен пропускать (без отключения самим выключателем) в течение заданного короткого промежутка времени. Обычно этот ток задают для времени действия 1 с. Тогда его называют *односекундным* током.

Конечно, для автоматического выключателя важно знать и то значение тока КЗ, которое возможно в процессе коммутации им этого тока. Этот ток называют током **наибольшей коммутационной способности**. Ток, который автоматический выключатель в состоянии *отключить однократно*, но может стать после этого непригодным к *немедленному включению*, называют **током предельной наибольшей отключающей способности** и обозначают I_{cu} .

Но в эксплуатации важно знать ток КЗ, который автоматический выключатель может *отключить неоднократно*, оставаясь пригодным для дальнейшей эксплуатации. Если такой ток выключатель может отключить *подряд трижды*, то его значение — ток **наибольшей эксплуатационной отключающей способности**. Его обозначают I_{cs} и задают обычно в процентах от I_{cu} . Вместе эти токи характеризуют отключающую способность автоматического выключателя.

Вопросы практики

Отключающая способность современных автоматических выключателей может быть от нескольких единиц до сотен килоампер. Выключатель одного и того же номинального тока может иметь разные значения отключающей способности. Наивысшие значения отключающей способности свойственны токоограничивающим автоматическим выключателям. Указываемые при этом значения токов I_{cu} являются лишь ожидаемыми действующими значениями. Эти значения никогда не достигаются в процессе отключения тока КЗ, потому что в действие вступает ограничение тока сопротивлением электрической дуги.

Если при отключенном выключателе в защищаемой им цепи существует короткое замыкание, то включение автоматического выключателя проис-

ходит в условиях возникновения (хотя бы в одной из фаз) ударного тока в первом полупериоде переходного процесса. Этот ток может в полтора-два раза превосходить действующее значение ожидаемого тока КЗ, и в момент замыкания контактов возможен их отброс электромагнитными силами с последующим замыканием. При этом из-за электрической дуги, возникающей при отбросе контактов, контакты могут частично расплавиться и при последующем замыкании свариться. Способность выключателя противостоять действию ударного тока КЗ характеризуют **током наибольшей включающей способности I_{cm}** .

В соответствии с современными стандартами значение I_{cm} задается изготовителем как максимальный ожидаемый пиковый ток, который аппарат может удовлетворительно включать в установленных условиях включения.

Вопросы практики

Понятие включающей способности может применяться и к другим условиям включения, а не только к условиям включения на существующее КЗ. В частности, опасные режимы включения возникают и при включении асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, особенно при их реверсировании. Такие токи во многом определяют категорию применения контакторов (см. гл. 3).

Базовая защитная характеристика. Уставки

Как правило, для аппаратов защиты автоматические выключатели характеризуют время-токовой зависимостью. Эта зависимость определяет связь времени отключения тока с его действующим значением. Такая характеристика обычно имеет *две* зоны токов: *зону токов защиты от перегрузки* (зона L) и *зону токов защиты от короткого замыкания* (зона I). В зоне защиты от токов КЗ отключение происходит мгновенно. Строго говоря, понятие **мгновенного отключения** трактуют как отключение, которое занимает время не большее 0,1 с.

Вид время-токовой характеристики автоматического выключателя представлен на рис. 2.8. На этом рисунке I_r обозначает **уставку защиты от перегрузки**. Ниже этого значения тока срабатывание автоматического выключателя не происходит. При больших токах срабатывание может произойти с некоторой задержкой. Задержка срабатывания t_r зависит от тока: чем больше величина тока, тем быстрее происходит срабатывание. Такая зависимость соблюдается в зоне L , которую называют *зоной защиты от перегрузок* или *зоной срабатывания с обратнозависимой выдержкой времени*. Две граничные линии 1 и 2 определяют разброс времени срабатывания t_r в зоне перегрузок. Этот разброс связан с технологическими допусками и с тем, что время срабатывания теплового расцепителя зависит от начального значения температуры его нагрева.

Разброс времени срабатывания в области малых перегрузок ограничивается стандартами следующим образом. Выбирается некоторое значение **условного времени** (это время обычно равно 1–2 ч). Затем для этого условного времени задают два значения тока — **условный ток нерасцепления I_{nt}** и **условный ток расцепления I_t** (см. рис. 2.8). Если выключатель

нагружен током I_{nt} , то срабатывание может наступить не ранее условного времени. Если выключатель нагружен током I_r , то задержка срабатывания должна быть не более условного времени. Вся зона L называется часто **зоной тепловой защиты**.

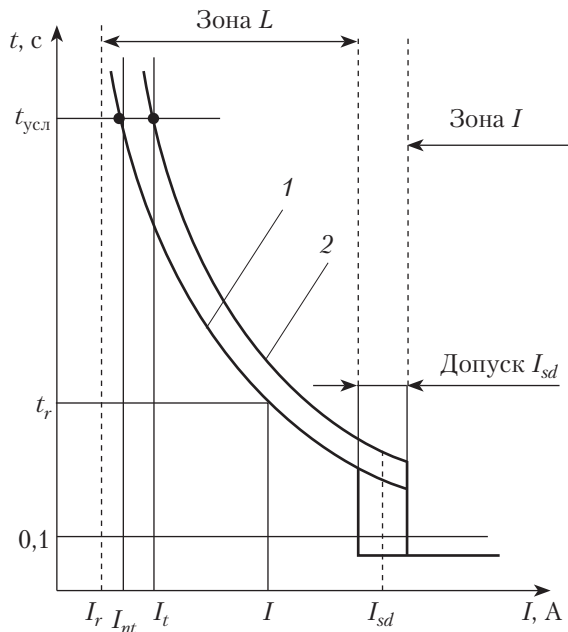


Рис. 2.8. Границы разброса времени защиты при перегрузке:
 1 — нижняя граница разброса времени защиты при перегрузке; 2 — верхняя граница разброса времени защиты при перегрузке

На рис. 2.8 установленное регулировкой значение тока мгновенного расцепления обозначено I_{sd} . Регулировка этого значения может быть осуществлена при изготовлении или операторами эксплуатации на месте установки автоматического выключателя. Разброс реальных значений **уставки мгновенного расцепления** нормируется стандартами или изготовителем. При токах выше верхней границы допуска расцепление всегда реализуется мгновенно. В пределах допуска время расцепления не определено. Оно или мгновенно, или имеет задержку, определяемую тепловой защитой.

В действительности, расцеплению предшествует некоторое время, и, как указано выше, расцепление называют *мгновенным*, если предшествующее ему время менее 0,1 с, что иллюстрирует рис. 2.8. Такое быстрое отключение необходимо при коротком замыкании и осуществляется, например, под действием электромагнитного максимального расцепителя (см. рис. 2.4). В таком расцепителе регулировка, как правило, затруднена и осуществляется, чаще всего, только в процессе изготовления. Если такая регулировка предусмотрена на месте установки, то она возможна в узких пределах и с большим шагом дискретности.

При микропроцессорном варианте блока контроля и управления в автоматическом выключателе сигнал на внутренний электромагнитный расце-

питатель подается немедленно, как только измерительный преобразователь микропроцессора зафиксирует превышение током значения уставки I_{sd} . Использование **микропроцессорного блока контроля и управления** расширяет возможности регулировки уставки мгновенного расцепления I_{sd} , а также и уставки I_r тепловой защиты.

Селективность автоматических выключателей

В системах распределения электрической энергии практически всегда возникает ситуация **каскадного включения** автоматических выключателей. При подобном включении в схеме можно выделить выключатель, установленный на более высоком уровне, т.е. ближе к источнику, и несколько выключателей более низкого уровня, которые защищают цепи, питаемые через общую линию, защищенную выключателем более высокого уровня. Фрагмент схемы такого распределения энергии представлен на рис. 2.9, б. При таком включении возникает вероятность того, что короткое замыкание в цепи, защищаемой выключателем $Q21$, создаст ток КЗ, достаточный для срабатывания и выключателя $Q21$ и вышестоящего выключателя $Q1$, если ток КЗ превзойдет верхнюю границу разброса уставки I_{sd1} (рис. 2.9, а). При этом, после отключения $Q1$ прервется питание и линии, защищенной выключателем $Q22$, что, конечно, нежелательно. Исключение нежелательного отключения «здоровых» участков сети может быть достигнуто, если соблюдается **принцип селективной работы автоматических выключателей**. Этот принцип состоит в том, что при аварии (например, при КЗ) *срабатывать* должен только выключатель, ближайший к месту аварии. В указанной схеме это должен быть автоматический выключатель $Q21$, а выключатель $Q1$ в этом случае срабатывать не должен.

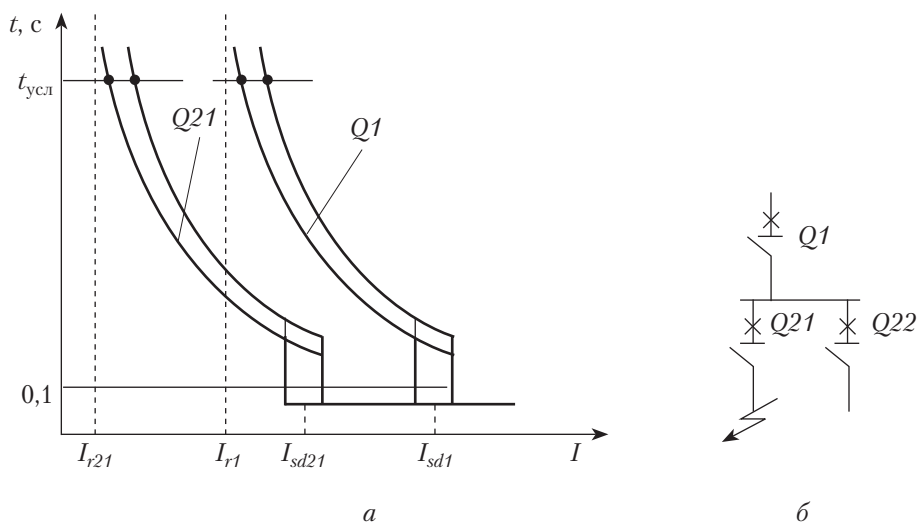


Рис. 2.9. Схема распределения электроэнергии при каскадном включении автоматических выключателей:

а — время-токовые характеристики каскадно включенных автоматических выключателей; б — схема включения

При токах КЗ, меньших нижней границы допуска уставки I_{sd1} селективность всегда соблюдается потому, что при таком токе выключатель $Q21$ срабатывает мгновенно за время менее 0,1 с, а выключатель $Q1$ мог бы сработать только при протекании тока значительно большее время, определяемое обратно зависимой ветвью его защитной характеристики.

Если необходимо расширить зону токов селективной работы, то следует применить выключатель $Q1$, обладающий возможностью создания **задержки отключения при токах КЗ**. Иными словами, его срабатывание не должно быть мгновенным на границе уставки I_{sd1} защиты от КЗ. Такая задержка осуществляется микропроцессорными блоками контроля и управления современных автоматических выключателей. При этом соответствующие время-токовые характеристики выключателей $Q1$ и $Q21$ выглядят так, как это представлено на рис. 2.10. Задержка срабатывания выключателя $Q1$ при токах выше уставки I_{sd1} обозначена на этом рисунке t_{sd} . Если ток КЗ протекает менее этого времени, то срабатывание выключателя $Q1$ не может произойти. Поэтому при токах бóльших, чем уставка I_{sd1} , за время мгновенного срабатывания выключателя $Q21$ ток КЗ прекратится, и срабатывание $Q1$ не наступит, так как время срабатывания $Q21$ менее 0,1 с, а для срабатывания $Q1$ требуется время t_{sd} , которое всегда удовлетворяет условию $t_{sd} \geq 0,1$ с.

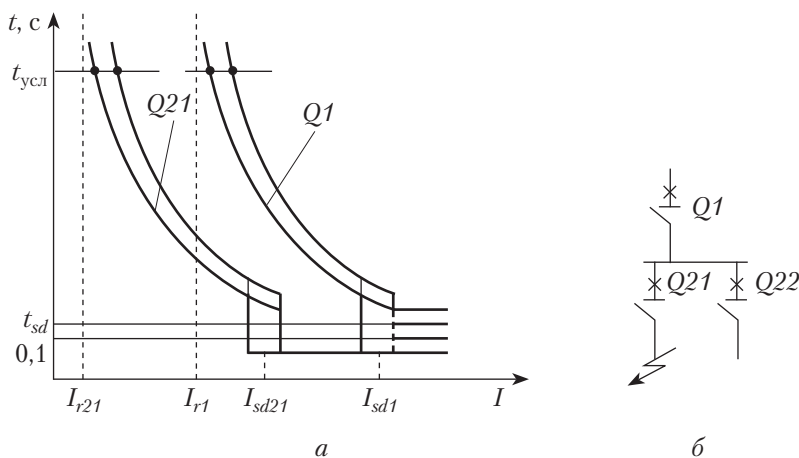


Рис. 2.10. Время-токовые характеристики выключателей в режиме селективной работы:

a — время-токовые характеристики каскадно включенных автоматических выключателей; *б* — схема включения

Вопросы практики

С учетом возможности задержки при отключении токов КЗ автоматические выключатели относят к разным категориям: если такая возможность существует, выключатель относят к категории В. Иначе, при невозможности создания задержки отключения на уровне токов КЗ автоматический выключатель относят к категории А. Задержка срабатывания при КЗ, реализуемая автоматическим выключателем, обычно устанавливается дискретно в пределах от 0,1 до 0,4 с.

Чтобы задержка отключения тока КЗ не возникала при очень больших токах, опасных для самого выключателя или для элементов сети, кроме уставки I_{sd1} на блоке контроля и управления предусматривается уставка мгновенного срабатывания I_i .

В практике применения автоматических выключателей используют и иные, более сложные, варианты обеспечения селективности [4].

2.4. Виды автоматических выключателей

Многообразие автоматических выключателей может быть условно разделено на несколько групп. Эти группы выделяются по конструктивным особенностям и в соответствии с типичным диапазоном номинальных токов. Наиболее известны *три* следующие группы автоматических выключателей.

Воздушные автоматические выключатели

Выключатели, собираемые в металлическом изолированном корпусе для диапазона номинальных токов от 630 до 6300 А. Эти выключатели часто называют воздушными и в технической документации обозначают аббревиатурой *ACB* (от англ. *Air Circuit Breakers*) или *ICCB* (*Isolated Case Circuit Breakers*). Эти выключатели чаще всего снабжают ныне микропроцессорными блоками контроля и управления. Такие выключатели обычно имеют встроенный привод, позволяющий дистанционно включать выключатель. Предельная наибольшая отключающая способность подобных аппаратов находится в интервале от десятков до сотен килоампер.

Выключатели в литом корпусе

Выключатели в литом корпусе (*MCCB* — от англ. *Moulded Case Circuit Breakers*) — выключатели, собираемые в неотъемлемой изолирующей оболочке, выполненной методом литья для диапазона номинальных токов от 100 до 630 А (и в отдельных вариантах до 1250 А). Для применения в сетях, удаленных от источника (от понижающего трансформатора подстанции), эти аппараты выпускают с невысокой отключающей способностью до нескольких десятков килоампер. Если эти выключатели предназначены для использования в главных распределительных щитах, то шкала отключающей способности может простираться от 20 до 150 кА. Высокие значения отключающей способности таких выключателей обеспечиваются за счет эффекта токоограничения.

Модульные автоматические выключатели

На уровне токов конечных потребителей от 1 до 125 А основными являются **модульные автоматические выключатели** (*MCB* — *Modular Circuit Breakers*). Отключающая способность таких аппаратов лежит в пределах от 6 до 25 кА. В этой группе необходимо выделить автоматические выключатели для тока до 63 А. Их относят к специальному классу аппаратов бытового и аналогичного назначения. Пример устройства модульного автоматического выключателя приведен на рис. 2.11.

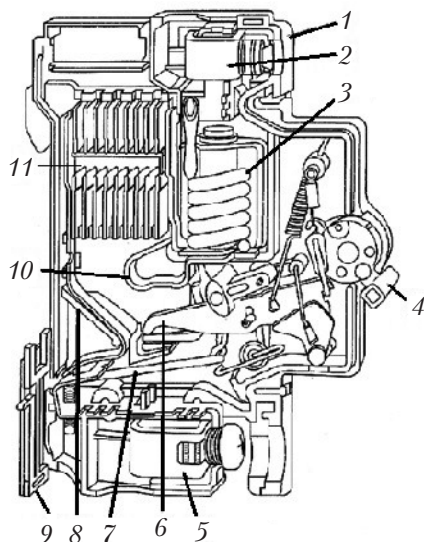


Рис. 2.11. Устройство модульного автоматического выключателя:

- 1 — корпус; 2 — гнездо верхнего вывода с зажимающим винтом; 3 — катушка электромагнитного расцепителя; 4 — рукоятка; 5 — гнездо нижнего вывода с винтом; 6 — подвижный контакт; 7 — термобиметаллическая пластина теплового расцепителя; 8 — дугогасительный рог подвижного контакта; 9 — фиксатор для крепления на профильной рейке; 10 — дугогасительный рог неподвижного контакта; 11 — дугогасительная камера

На практике к этим аппаратам при эксплуатации может иметь доступ неквалифицированный персонал. Поэтому к автоматическим выключателям этой группы предъявляют особые требования к безопасности. В частности, винты выводов недоступны для прямого соприкосновения снаружи, так как заглублены по отношению к поверхности корпуса. В ряде случаев, после присоединения внешних проводов, отверстия доступа к винтам могут закрываться пластиковыми заглушками, что полностью исключает соприкосновение с винтами. Конструктивно модульные аппараты предназначены для крепления на профильной рейке. Многополюсные модульные аппараты могут собираться из отдельных физических модулей, каждый из которых представляет собой однополюсный автоматический выключатель. Для обеспечения одновременности замыкания и размыкания нескольких полюсов их физически связывают при сборке общей рукояткой.

К числу *особых требований* относится то, что уставки защиты от перегрузки и защиты от КЗ малогабаритных модульных автоматических выключателей бытового и аналогичного назначения не регулируются. Уставки защиты от перегрузки модульных автоматических выключателей совпадают с их номинальными токами, которые представлены в номенклатуре этих аппаратов.

Каждый модульный автоматический выключатель с заданным номинальным током может быть изготовлен по особому варианту защитной характеристики. Варианты защитных характеристик регламентированы

стандартом Международной электротехнической комиссии (МЭК) и его аналогом — стандартом России [3]. Стандартами предусмотрены три варианта защитной характеристики. Каждый вариант определяет **диапазон допустимых значений тока расцепления при КЗ**, т.е. уставок мгновенного расцепления. При этом уставка конкретного экземпляра автоматического выключателя остается неизвестной и может меняться в процессе эксплуатации, но только в допустимых пределах. **Диапазон токов мгновенного расцепления** относится к числу важнейших характеристик модульного автоматического выключателя и может быть типа *B*, *C* или *D*. Каждый диапазон определяет нижнюю и верхнюю границы допуска тока мгновенного расцепления. Эти границы задают кратностью по отношению к номинальному току I_n . В табл. 2.1 представлены границы допуска мгновенного расцепления и типичные области применения автоматических модульных выключателей.

Таблица 2.1

Типы защитных характеристик модульных автоматических выключателей

Тип защитной характеристики	Границы допуска мгновенного расцепления	Область применения
<i>B</i>	$(3-5)I_n$	Защита цепей без бросков тока: генераторы, кабельные и воздушные линии большой длины
<i>C</i>	$(5-10)I_n$	Общее применение: защита розеточных и осветительных цепей
<i>D</i>	$(10-20)I_n$	Защита цепей с большими бросками тока: пуски двигателей, включение трансформаторов

Вид время-токовых характеристик модульных автоматических выключателей типов *B*, *C* и *D* с одинаковым значением номинального тока представлен на рис. 2.12.

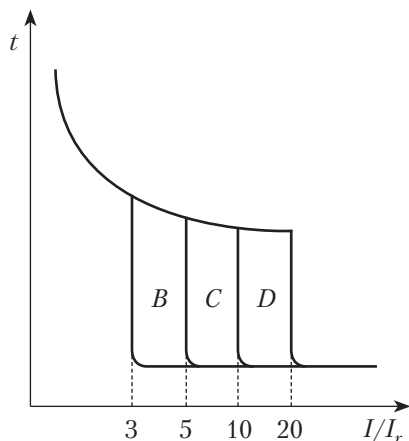


Рис. 2.12. Время-токовые характеристики модульных автоматических выключателей различных типов

Большинство изготовителей представляют модульные выключатели с номинальными токами из ряда 1; 4; 6,3; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100 и 125 А.

Кроме того, изготовители могут выпускать автоматические выключатели с типами характеристик, отличающимися от стандартных. Например, для защиты полупроводниковых устройств выключатели могут выпускаться с характеристиками, которые задаются номинальным значением уставки мгновенного расцепления $3I_n$ и допуском $\pm 20\%$. Изготовители могут сужать допустимый интервал разброса уставки мгновенного расцепления. Так, для ряда инновационных аппаратов *SchneiderElectric* определяет интервал типа *C* как $8I_n \pm 20\%$, а для типа *D* задает интервал от 10- до 14-кратного значения номинального тока.

2.5. Автоматические аппараты, управляемые дифференциальным током. Функциональное назначение

Пользование электроэнергией сопряжено с опасностью поражения человека электрическим током и опасностью возникновения пожара [4]. Тело человека является токопроводящей средой. Ток через тело человека зависит от напряжения, воздействующего на тело, называемого «напряжение прикосновения», и электрического сопротивления тела, которое, в свою очередь, зависит от ряда факторов, например от влажности кожного покрова и т.п. В результате медицинских исследований выяснены характеристики физиологического воздействия электрического тока на человека и определены допустимые и недопустимые значения тока и длительности его протекания, на основе которых созданы стандарты по электробезопасности. На рис. 2.13 приведены соответствующие графики из международного стандарта МЭК 479—94 «Действие электрического тока, проходящего по телу человека».

Соблюдение правил техники безопасности на производстве сводит к минимуму вероятность электротравматизма персонала. Однако в обычной жизни бытовые машины и электроприборы, средства оргтехники, электроинструмент эксплуатируют лица зачастую без специальной подготовки. Их риск попасть под опасное напряжение существенно выше. Возникающие при этом токи (в силу их малости на фоне токов нормальных режимов) не обнаруживаются аппаратами защиты от сверхтоков.

В связи с этим созданы специальные аппараты, обесточивающие электроустановку в случае прикосновения человека к токопроводящей части, нормально находящейся под напряжением («прямое прикосновение») или оказавшейся под напряжением вследствие повреждения изоляции («косвенное прикосновение»). Такие аппараты, применяемые в электроустановках 0,4 кВ как дополнительное средство защиты, получили название **устройства защитного отключения (УЗО)**.

На рис. 2.14 показано распределение токов в случае «прямого прикосновения» в однофазной двухпроводной сети с глухо заземленной нейтралью. Поскольку человек оказывается под фазным «напряжением прикоснове-

ния», он условно изображен в виде сопротивления R_d , подсоединенного между фазным проводником и землей. По фазному проводнику L протекает сумма токов: ток нагрузки I_n и ток через тело человека I_d . По нулевому проводнику N протекает ток нагрузки I_n . Таким образом, ток, протекающий через тело человека, можно рассматривать как разность токов фазного и нулевого проводников. Его называют дифференциальным током.

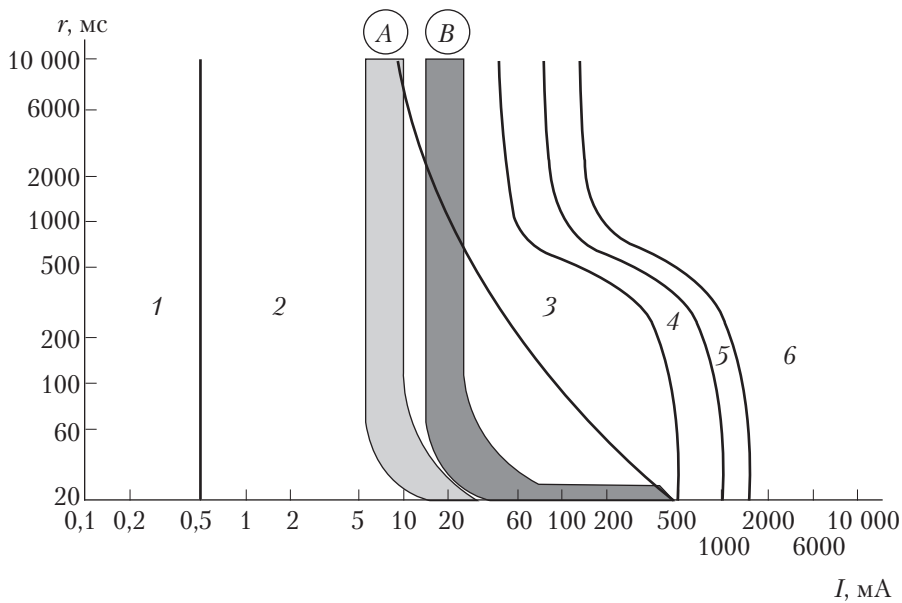


Рис. 2.13. Графики физиологического действия на человека тока частотой 50–60 Гц:

- 1 — неощутимые токи; 2 — оощутимые, но не вызывающие физиологических нарушений; 3 — оощутимые, но не вызывающие опасность фибрилляции сердца; 4 — оощутимые, вызывающие опасность фибрилляции сердца (вероятность до 5%); 5 — оощутимые, вызывающие опасность фибрилляции сердца (вероятность выше 50%); 6 — оощутимые, вызывающие опасность фибрилляции сердца (вероятность выше 50%), и время-токовые характеристики УЗО: A ($I_{\Delta} = 10 \text{ мА}$) и B ($I_{\Delta} = 30 \text{ мА}$)

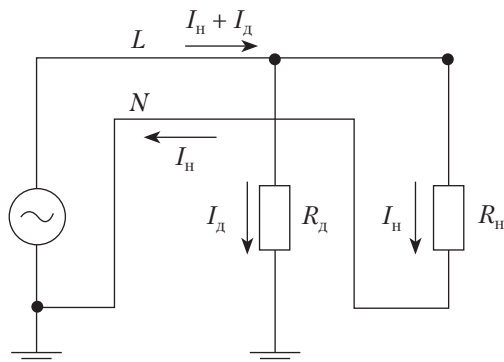


Рис. 2.14. Распределение токов при «прямом прикосновении»:
 R_n и R_d — сопротивления нагрузки и тела человека, соответственно