

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ  
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА

Под редакцией **П. А. Курбатова**

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

Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)

Москва ■ Юрайт ■ 2017

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 «Московский энергетический институт».

**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 аппараты** : учебник и практикум для академического бакалавриата / под ред. П. А. Курбатова. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 250 с. — Серия : Бакалавр. Академический курс.

ISBN 978-5-9916-9715-6

В книге рассмотрены основные сведения об электромеханических 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.

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.*

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 978-5-9916-9715-6

© Коллектив авторов, 2016

© ООО «Издательство Юрайт», 2017

## Оглавление

<b>Авторский коллектив.....</b>	<b>7</b>
<b>Список сокращений.....</b>	<b>8</b>
<b>Предисловие .....</b>	<b>10</b>
<b>Глава 1. Электрический аппарат как средство управления режимами работы, защиты и регулирования параметров системы.....</b>	<b>12</b>
1.1. Функциональное назначение и классификация электрических аппаратов....	12
1.2. Примеры применения электрических аппаратов в сетях высокого и низкого напряжения .....	16
Выводы.....	19
Вопросы и задания для самоконтроля.....	19
Рекомендуемая литература .....	20
<b>Глава 2. Электромеханические аппараты систем распределения электрической энергии при низком напряжении .....</b>	<b>21</b>
2.1. Предохранители. Устройство и принцип действия предохранителей .....	21
2.2. Выключатели низкого напряжения. Выключатели нагрузки низкого напряжения.....	25
2.3. Автоматические выключатели. Устройство и параметры. Назначение и основные элементы автоматического выключателя.....	27
2.4. Виды автоматических выключателей.....	37
2.5. Автоматические аппараты, управляемые дифференциальным током. Функциональное назначение .....	40
2.6. Практические задачи.....	48
Выводы.....	51
Вопросы и задания для самоконтроля.....	51
Рекомендуемая литература .....	53
<b>Глава 3. Электромеханические аппараты управления.....</b>	<b>54</b>
3.1. Классификация и основные технические параметры аппаратов управления.....	54
3.2. Контактторы и магнитные пускатели. Устройство и принцип действия .....	62
3.3. Тепловые реле. Устройство и принцип действия теплового реле.....	72
3.4. Электромагнитные реле. Устройство и принцип действия реле .....	78
3.5. Практические задачи.....	83
Выводы.....	88
Задачи для самостоятельного решения.....	88
Вопросы и задания для самоконтроля.....	89
Рекомендуемая литература .....	89

<b>Глава 4. Тепловые процессы в электрических аппаратах .....</b>	<b>91</b>
4.1. Источники теплоты в электрических аппаратах и способы теплопередачи.....	91
4.2. Уравнение Ньютона — Рихмана. Уравнение теплообмена с окружающим пространством.....	92
4.3. Стационарный режим нагрева. Уравнение теплового баланса и условие стационарности .....	93
4.4. Переходный процесс нагрева. Дифференциальное уравнение переходного процесса.....	96
4.5. Нагрев при коротком замыкании. Кривые адиабатического нагрева .....	100
4.6. Нагрев в повторно-кратковременном режиме. Условия существования и классы повторно-кратковременного режима.....	103
Выводы.....	106
<i>Задачи для самостоятельного решения.....</i>	<i>106</i>
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>107</i>
<i>Рекомендуемая литература .....</i>	<i>108</i>
<b>Глава 5. Электрические контакты .....</b>	<b>109</b>
5.1. Понятие электрического контакта.....	109
5.2. Сопротивление электрического контакта. Понятие переходного сопротивления контакта .....	111
5.3. Влияние контактов на нагрев проводников .....	116
5.4. Сваривание контактов. Температура площадки касания электрических контактов.....	119
5.5. Контактные материалы.....	124
5.6. Практические задачи.....	126
Выводы.....	127
<i>Задачи для самостоятельного решения.....</i>	<i>128</i>
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>128</i>
<i>Рекомендуемая литература .....</i>	<i>129</i>
<b>Глава 6. Электродинамические усилия в электрических аппаратах ....</b>	<b>130</b>
6.1. Понятие о силах взаимодействия проводников .....	130
6.2. Электродинамические силы при переменном токе .....	134
6.3. Электродинамическая стойкость .....	135
6.4. Практические задачи оценки электродинамической стойкости.....	136
Выводы.....	139
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>139</i>
<i>Рекомендуемая литература .....</i>	<i>140</i>
<b>Глава 7. Электромагниты.....</b>	<b>141</b>
7.1. Электромагнитные приводы электрических аппаратов .....	141
7.2. Электромагниты в электромеханической системе электрического аппарата.....	156
7.3. Электромагниты постоянного тока.....	164
7.4. Электромагниты переменного тока.....	180
7.5. Катушки электромагнитов .....	188

Выводы.....	191
<i>Задачи для самостоятельного решения.....</i>	<i>192</i>
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>193</i>
<i>Рекомендуемая литература .....</i>	<i>194</i>
<b>Глава 8. Электрическая дуга и процесс коммутации .....</b>	<b>195</b>
8.1. Особенности процессов коммутации электрических цепей.....	195
8.2. Электрическая дуга, процесс горения и гашения. Плазма электрической дуги и процессы в ней .....	197
8.3. Способы гашения электрической дуги .....	212
8.4. Практические задачи .....	217
Выводы.....	219
<i>Задача для самостоятельного решения.....</i>	<i>220</i>
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>220</i>
<i>Рекомендуемая литература .....</i>	<i>221</i>
<b>Глава 9. Электрические аппараты высокого напряжения .....</b>	<b>222</b>
9.1. Классификация электрических аппаратов высокого напряжения .....	222
9.2. Коммутационные аппараты высокого напряжения .....	225
9.3. Ограничивающие аппараты .....	235
9.4. Измерительные трансформаторы. Трансформаторы тока.....	240
Выводы.....	247
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>247</i>
<i>Рекомендуемая литература .....</i>	<i>248</i>
<b>Новые издания по дисциплине «Электрические аппараты» и смежным дисциплинам.....</b>	<b>249</b>
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>250</b>



## **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;

**Райнин Валерий Ефимович**, доктор технических наук, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов Национального исследовательского университета «МЭИ» — гл. 1, параграф 2.5.

## Список сокращений

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

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.

В учебнике, 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 электро-

магнитных, механических, тепловых и иных физических процессов, определяющих функционирование аппарата.

Изучение дисциплины «Электрические аппараты» способствует формированию профессиональных компетенций, характеризующих студента в рамках **научно-исследовательской, проектно-конструкторской и организационно-управленческой деятельности**. В результате изучения материалов учебника студент должен:

**знать**

- научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике, связанной с электрическими аппаратами;
- существо задач анализа поведения электрических аппаратов в системах распределения электрической энергии;

**уметь**

- планировать и выполнять экспериментальные исследования электрических аппаратов по заданной методике, обрабатывать результаты экспериментов;
- применять методы испытаний объектов профессиональной деятельности;
- выполнять проектные и конструкторские разработки простых систем распределения электрической энергии низкого напряжения с использованием электрических аппаратов на основе общих принципов проектно-конструкторской деятельности, методов анализа и моделирования;
- анализировать технологический процесс как объект управления, обеспечивать соблюдение заданных параметров качества продукции, контролируя и обеспечивая соблюдение требований безопасности жизнедеятельности с использованием специализированных электрических аппаратов;
- обосновывать принятие конкретных технических решений при выборе электрических аппаратов и разработке объектов профессиональной деятельности, использующих эти аппараты;

**владеть**

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

# 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 устанавливают реакторы  $LR$ , одно из назначений которых — ограничение токов короткого замыкания. На схеме не показаны разъединители, необходимые, прежде всего, для безопасного обслуживания элементов энергосистемы.

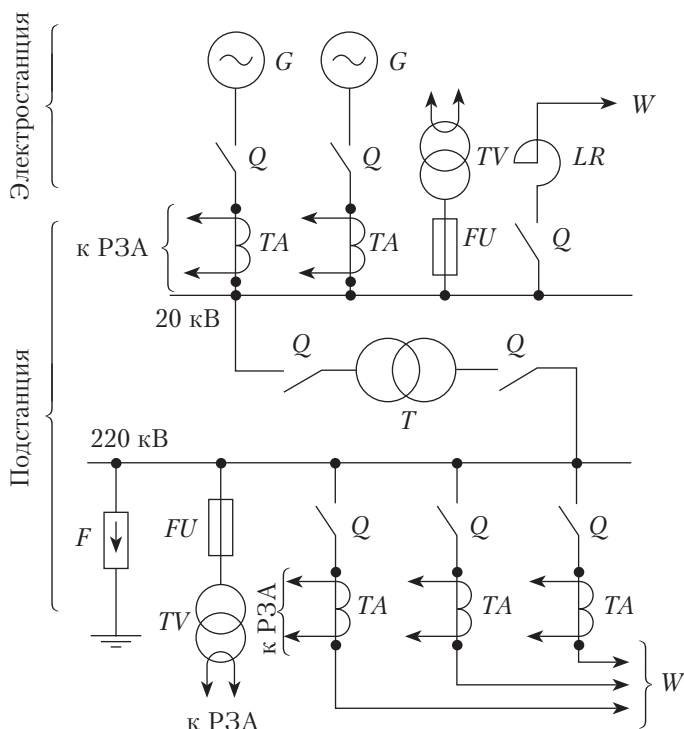


Рис. 1.1. Схема включения аппаратов на электрической станции и примыкающей к ней повышающей подстанции

Рассмотрим пример применения аппаратов низкого напряжения. На рис. 1.2 приведена схема управления асинхронным двигателем *М*. 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.

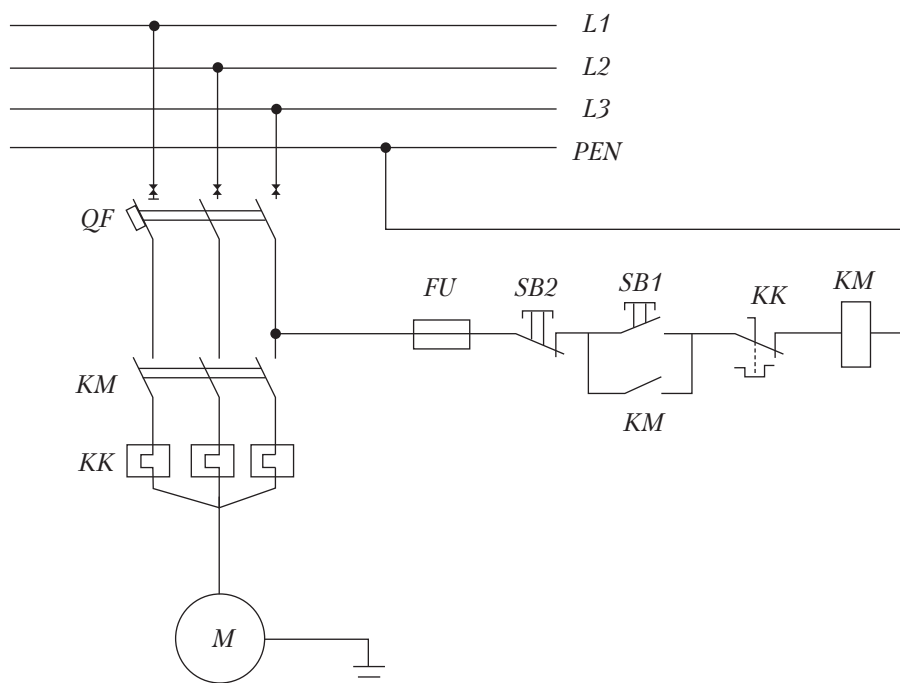


Рис. 1.2. Схема управления асинхронным двигателем

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.

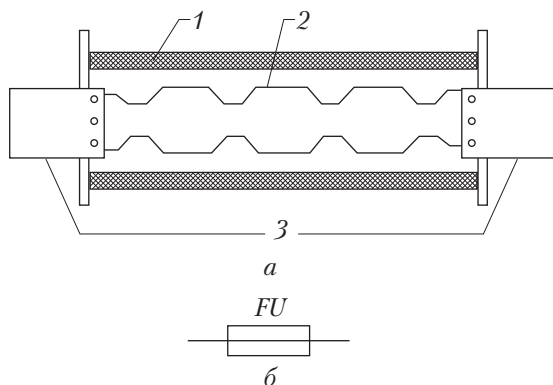


Рис. 2.1. Схема типовой конструкции предохранителя:

*а* — 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 привлекать 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*<sup>1</sup> 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.

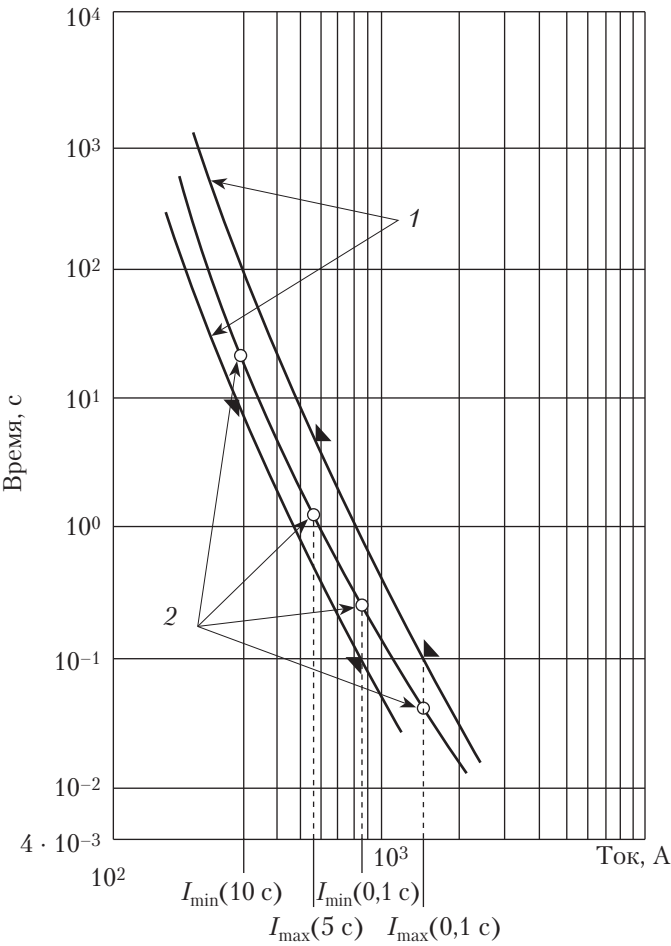
Время-токовая характеристика предохранителя в реальных условиях подвержена разбросу времени и соответствующего тока. Типичные защитные характеристики плавкой вставки представлены на рис. 2.2.

Ограничивая возможный разброс этих характеристик, с учетом российских 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;

<sup>1</sup> 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 бóльших, 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  $I_{cw}$ . 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.